

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»
Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова
Національної академії наук України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Запорізький національний університет
Інститут модернізації та змісту освіти
Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті
Університет Кардіффу
Мадридський політехнічний університет
Громадська організація «Системні дослідження»
Громадська організація МДЦВЕ

МАТЕРІАЛИ
XXVII Міжнародного
науково-практичного семінару
"КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ ТА ЇХНІ ЗАСТОСУВАННЯ"
присвяченого 125-річчю
Національного університету «Запорізька політехніка»
4-6 червня 2025 року



Запоріжжя - Кропивницький – Київ
Україна

УДК 004:519

С 91

*Рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету
«Запорізька політехніка» (Протокол № 12 від 27.06.2025 р.)*

Редакційна колегія

Гуляницький Л.Ф., член-кор. НАН України, д.т.н., старший науковий співробітник, завідувач відділом методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних ІТ Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України;

Бакурова А.В., доктор економ. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики НУ «Запорізька політехніка»;

Семенюта М.Ф., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету.

С 91

Матеріали XXVII Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», присвяченого 125-річчю Національного університету «Запорізька політехніка» (Запоріжжя-Кропивницький-Київ, 4-6 червня 2025 р.), [Електронний ресурс] Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. – 200 с.

ISBN 978-617-529-515-1

У збірнику представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень за основними напрямками роботи семінару: 1. Комбінаторні конфігурації, графи та задачі оптимізації на них. 2. Автомати, скінченні алгебри, математична логіка і теорія множин, теорія ігор і теорія прийняття рішень, кодування та розпізнавання образів, їхнє застосування в різних галузях. 3. Математичні моделі дискретних процесів і систем різного призначення. 4. Програмне забезпечення синтезу та аналізу комбінаторних конфігурацій. 5. Графи знань, онтології, машинне навчання, графові бази даних, штучний інтелект. Видання стане корисним для студентів, викладачів, науковців та фахівців галузі інформаційних технологій, математики.

УДК 004:519

ISBN 978-617-529-515-1

© НУ «Запорізька політехніка», 2025

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ СЕМІНАРУ

Голова:

Леонід ГУЛЯНИЦЬКИЙ, член-кор. НАН України, д.т.н., старший науковий співробітник, завідувач відділом методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних ІТ Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України

Заступники голови:

Анна БАКУРОВА, д.е.н., професор, професор кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»

Марина СЕМЕНЮТА, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету

Члени програмного комітету:

- **Стен УРЯССВ**, професор, завідувач кафедри прикладної математики та статистики родини Фрей, Університет Стоні-Брук, США;
- **Петер КАМЕРОН**, доктор наук, Школа математики і статистики університету Сент-Ендрюс, Шотландія;
- **Олександр КОНОВАЛОВ**, д-р, викладач Школа комп'ютерних наук, Університет Сент-Ендрюс, Центр міждисциплінарних досліджень з обчислювальної алгебри Сент-Ендрюс GAP Center, Шотландія;
- **Ілля САФРО**, доктор філософії, заступник завідувача кафедри аспірантури та досліджень, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних наук, Університет Делаверу, США;
- **Борис ГОЛЬДЕНГОРІН** д.т.н., професор; PhD, Університет Гронінгена, Нідерланди;
- **Улугбек НАРЗУЛЛАЕВ**, к.ф.-м.н., доцент, декан факультету телекомунікаційних технологій і професійної освіти Самаркандського філіалу Ташкентського університету інформаційних технологій, Узбекистан;

- **Ігор КОЗІН**, д.ф.-м.н., професор, професор кафедри економічної кібернетики Запорізького національного університету;
- **Сергій КРИВИЙ**, д.ф.-м.н., професор, професор кафедри інтелектуальних програмних систем Київського національного університету ім. Т. Шевченка;
- **Віктор КУЗЬМЕНКО**, к.ф.-м.н., старший науковий співробітник, завідувач відділом економічної кібернетики Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України;
- **Микола МАЛЯР**, д.т.н., професор, професор кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету;
- **Єлизавета МЕЛЕШКО**, д.т.н., професор, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету;
- **Марина НОВОЖИЛОВА**, д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О.Бекетова;
- **Віталій ПЕРЕПЕЛИЦЯ**, д.ф.-м.н., професор, професор кафедри економічної кібернетики Запорізького національного університету;
- **Тетяна РОМАНОВА**, д.т.н., професор, провідний науковий співробітник відділу нелінійної механіки та математичного моделювання Інституту енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України;
- **Олексій СМІРНОВ** – д.т.н., професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету;
- **Петро СТЕЦЮК**, член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., старший науковий співробітник, завідувач відділом методів негладкої оптимізації Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України;

- **Еліна ТЕРЕЩЕНКО**, к.ф.-м.н., доцент, в.о. завідувача кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»;
- **Надія ТИМОФІЄВА**, д.т.н., завідувачка відділу комплексних досліджень інформаційних технологій, Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України;
- **Валентина ТУРЧИНА**, к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету ім.О.Гончара;
- **Світлана УС**, к.ф.-м.н., доцент, професор кафедри «Системного аналізу і управління» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
- **Василь ШЕНДЕРОВСЬКИЙ**, д.ф.-м.н., професор, віцепрезидент Українського фізичного товариства;
- **Тетяна ШМЕЛЬОВА**, д.т.н., професор, професор кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету;
- **Сергій ЯКОВЛЕВ**, член кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., професор, професор-дослідник Інституту математики Лодзьського політехнічного університету.
- **Зоя ШЕРМАН**, к.ф.м.н., доцент, Department of Mathematics, Faculty of Science, University of Malta, Malta.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- **Володимир БАХРУШИН**, професор, д.ф.-м.н., професор кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики», голова Вченої ради НУ «Запорізька політехніка»;
- **Сергій ЯКИМЕНКО**, к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету;
- **Григорій КОРНІЧ**, д.ф.-м.н., професор, професор кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»;

- **Сергій ОСАДЧИЙ**, д.т.н., професор, завідувач кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Української державної льотної академії;
- **Людмила ДЖУМА**, к.т.н., доцент, доцент кафедри фізико-математичних дисциплін та застосування інформаційних технологій в авіаційних системах Льотної академії НАУ;
- **Галина КОЗИНА**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри «Захист інформації» НУ «Запорізька політехніка»;
- **Олександр НЕСТЕРЕНКО**, д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Міжнародного Європейського університету;
- **Володимир ПЕТРЕНЮК**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету;
- **Дмитро ПЕТРЕНЮК**, к.ф.-м.н., молодший науковий співробітник відділу економічної кібернетики Інституту кібернетики НАН України;
- **Антон РЯБЕНКО**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»;
- **Алла САВРАНСЬКА**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»;
- **Поліна СТЄГАНЦЕВА**, к.ф.-м.н., професор, професор кафедри загальної математики Запорізького національного університету;
- **Дмитро ШИРОКОРАД**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри «Системного аналізу та обчислювальної математики» НУ «Запорізька політехніка»;
- **Ірина ФІЛІМОНІХІНА**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету;

Записи роботи семінару 4-6 червня 2025 р.

можна прослухати за посиланням:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLmcZz9szodj7-pTc0O7ErdYG_5WYPNEnh

а також на сторінках семінару:

https://www.facebook.com/groups/381793555501252?locale=uk_UA
<https://zp.edu.ua/conference-2025-1-6>

НАПРЯМКИ РОБОТИ СЕМІНАРУ

1. Комбінаторні конфігурації, графи та задачі оптимізації на них.
2. Автомати, скінченні алгебри, математична логіка і теорія множин теорія ігор і теорія прийняття рішень, кодування та розпізнавання образів, їхнє застосування в різних галузях.
3. Математичні моделі дискретних процесів і систем різного призначення.
4. Програмне забезпечення синтезу та аналізу комбінаторних конфігурацій.
5. Графи знань, онтології, машинне навчання, графові бази даних, штучний інтелект.

Офіційними мовами семінару є українська та англійська.

ЗМІСТ

ВІТАЛЬНІ СЛОВА ВІД ОРГАНІЗАТОРІВ УЧАСНИКАМ СЕМІНАРУ.....	14
---	-----------

СЕКЦІЯ 1. КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ, ГРАФИ ТА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ НА НИХ

СЕКЦІЯ 2. АВТОМАТИ, СКІНЧЕННІ АЛГЕБРИ, МАТЕМАТИЧНА ЛОГІКА І ТЕОРІЯ МНОЖИН, ТЕОРІЯ ІГОР І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, КОДУВАННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ, ЇХНЄ ЗАСТОСУВАННЯ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ.....	20
--	-----------

ЄГЕР Максим

Результати огляду статей про розв'язання задач маршрутизації транспортних засобів Results of critical review of the papers on solving vehicle routing problem	20
---	----

ІЗВАЛОВ Олексій

Еволюція топології нейромереж, що керують поведінкою цифрових істот Topology evolution of algorithmic approaches which solve the vehicle routing problem.....	27
--	----

КАСІМ Аніса, СТЕЦІЮК Петро, ХОМ'ЯК Ольга

Задача комівояжера з багатьма розв'язками Traveling salesman problem with many solutions	33
--	----

МИРОНЕНКО О.В.

Деякі випадки одержання біциклічної t-факторизації повного графу методом паралельного перенесення міждолевого ребра Some cases of obtaining a bicyclic t-factorization of a complete graph by the method of parallel transfer of an inter-sectional ead.....	37
---	----

ПЕТРЕНЮК Володимир., ПЕТРЕНЮК Дмитро

Планарні графи з наперед заданою клітковою довжиною заданої множини точок	
---	--

Planar graphs with a pre-given cell length of a given set of points	44
---	----

СЕМЕНЮТА Марина,

Необхідна умова існування збалансованої суміжно-нульової розмітки
узагальненого графа Петерсена

A necessary condition for the existence of a balanced zero-neighborhood labeling of a generalized Petersen graph	50
---	----

Irene SCIRIHA, Zoia SHERMAN, and James L. BORG

Розмітка вершин квадратичними різницями для порогових графів
Square difference vertex labelling for threshold graphs

	54
--	----

СОЛОМКО Михайло

Спрощення симетричних булевих функцій методом образних
перетворень

Simplification of symmetric boolean functions by the method of figurative transformations	57
--	----

ШЕВЧЕНКО В.В.

Методи зберігання та проблеми обробки ретроспективних даних
Storage methods and problems of processing retrospective data

	65
--	----

СЕКЦІЯ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

СЕКЦІЯ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ КОМБІНАТОРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ.

	68
--	----

АКГЮН Озгюр, Özgür AKGÜN

Constraint programming with CONJURE inside JUPYTER NOTEBOOKS
Програмування обмежень за допомогою CONJURE в середовищі
JUPYTER NOTEBOOKS

	68
--	----

ВЕЛИЧКО Аннvwдрій, ДУБРОВІН Валерій

Нечітка СППР для управління портфелем проєктів енергозбереження на енергоємних підприємствах

Fuzzy DSS for managing a portfolio of energy saving projects at energy-intensive enterprises

.....78

ВІНТЕНКО Борис, СМІРНОВ Олексій, МИРОНЕЦЬ Ірина, СМІРНОВА Тетяна, СМІРНОВ Сергій

Імітаційна модель шляхів вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оператора енергоблоку АЕС

Simulation model of input data paths of a computer intelligent support system for a NPP power unit operator

.....82

KALASHNYK G.A., KALASHNYK-RYBALKO M.A.

Модель зміни робочих станів об'єкта інформаційної взаємодії інформаційного забезпечення цивільної авіації

Model of change of working states of the object of information interaction of information support of civil aviation

.....91

КОЗІН Ігор, БОРЮ Сергій, САРДАК Олег

Фрагментарні моделі для задач покриття

Fragmentary models for coverage problems

.....97

КОНОВАЛОВ Олександр, Olexandr KONOVALOV,

Робота з графами у системі комп'ютерної алгебри GAP (демонстрація роботи з GAP)

Exploring graphs using the computational algebra system GAP (software demo)

.....102

КОРОЛЬОВ Вячеслав, ОГУРЦОВ Максим, РИБАЛЬЧЕНКО Олег, ЯРУШЕВСЬКИЙ Олександр

Оцінка математичних моделей руху автономних груп агентів в локально-центричній навігації

Mathematical model of autonomous agent group movement evaluation in local-centric navigation

.....106

РЯБЕНКО Антон, ТЕРЕЩЕНКО Еліна, БАКУРОВА Анна Дизайн змагань як інструмент для побудови сильної команди Design of competitions as a tool for building a strong team	115
РЯСНА Ірина, СЕНЬКО Олександр Нечіткі моделі в маркетингу послуг на основі нечітких комбінаторних конфігурацій Fuzzy models in service marketing based on Fuzzy combinatorial configurations	121
СЕМЕНЮТА Марина, ФІЛІМОНІХІНА Ірина, Про моделювання гри на регулярному графі On modeling a game on a regular graph	126
ТИВОДАР Станіслав¹, СТЕЦЮК Петро² Використання солвера BARON для знаходження оптимальної упаковки нерівних кругів у квадрат Using the BARON solver to find the optimal packing of unequal circles into a square	131
ТИМОФІЄВА Надія Комбінаторна оптимізація та її характерні особливості Combinatorial optimization and its characteristic features	137
ЩЕРБАКОВ Сергій, ШИРОКОРАД Дмитро Ефективність дуальної системи навчання для закладів вищої освіти Effectiveness of the dual education system for higher education institutions	144
СЕКЦІЯ 5. ГРАФИ ЗНАНЬ, ОНТОЛОГІЇ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ГРАФОВІ БАЗИ ДАНИХ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ	149

ВЕДМЕДЄВ Станіслав

Створення онтології фенотипічних ознак соняшника HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED & HEAD): цифровізація характеристик насіння

Creation of an ontology of sunflower phenotypic traits HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED & HEAD): digitization of seed characteristics

.....149

ГРИНЧЕНКО Павло, БАКУРОВА Анна

Застосування вейвлет-аналізу для валідації даних у системах оцінки ризиків"

Application of wavelet analysis for data validation in risk assessment systems

.....151

ГРІЦКЕВИЧ Анатолій

Прикладне рішення для оцінки ризику аномальної поведінки суб'єктів у IT-інфраструктурах

An applied solution for assessing the risk of anomalous behavior of subjects in IT infrastructures

.....159

ЛИТВИНЕНКО Артем

YOLO-базоване розпізнавання рогів оленів для екологічного моніторингу

YOLO-based deer antler recognition for environmental monitoring

.....165

Rosella Omana MANCILLA

Рішення для виявлення аномалій на базі федеративного навчання

A federated learning base anomaly detection solution

.....167

ОМЕЛЬЯНЕНКО Іван

Система керування онтологіями на основі графових баз даних для сільськогосподарської сфери: досвід інтеграції в NEO4J

Graph-based ontology control system for the agricultural domain: integration experience in NEO4J

.....173

PROKOPCHUK Yurii

Комбінаторний, розширюваний фазовий простір когнітивних динамічних систем

Combinatorial, expanding phase space of cognitive dynamic systems

.....175

ТЕРНИЦЬКИЙ Владислав, ШИРОКОРАД Дмитро

Дисбаланс збудження/гальмування як нейробіологічний маркер у спектрі психозів та аутизму: висновки на основі нейровізуалізації та обчислювальних моделей

Excitation/inhibition imbalance as a neurobiological marker in psychosis and autism spectrum disorders: findings based on neuroimaging and computational models

.....183

ТРЕТЯК Олександр, ДУБРОВІН Валерій

Виявлення несанкціонованих дій та атак у комп'ютерних мережах з використанням ансамблю моделей

Detection of unauthorized actions and attacks in computer networks using an ensemble of models

.....188

РЕЗОЛЮЦІЯ СЕМІНАРУ.....192

ФОТОМАТЕРІАЛИ.....196

ВІТАЛЬНІ СЛОВА ВІД ОРГАНІЗАТОРІВ СЕМІНАРУ

Вітальне слово учасникам семінару від Національного університету «Запорізька політехніка»

Шановні учасники семінару «Комбінаторні конфігурації», від імені нашого університету хочу подякувати всім, хто завітав сьогодні до нас з України і з інших країн. В цьому році нашому університету 125 років, тому семінар присвячується цій річниці. Яким чином пов'язаний наш університет з семінаром «Комбінаторні конфігурації»? Хочу відзначити, що університет «Запорізька політехніка» є спів організатором проведення цих семінарів, починаючи з 2020 року. В розвитку семінару також приймав активну участь наш керівник, Віталій Опанасович Перепелиця, творчий шлях якого починався з університету «Запорізька політехніка». Зараз на нашій кафедрі системного аналізу та обчислювальної математики присутні чотири кандидати наук, яких випустив свого часу Віталій Опанасович Перепелиця. Це: Рябенко Антон Євгенович, Терещенко Еліна Валентинівна, Бакурова Анна Володимирівна і Козіна Галина Леонідівна. - це все учні Віталія Опанасовича Перепелиці, який присвятив багато років розвитку теорії графів, комбінаторній оптимізації, багатокритеріальні оптимізації і, звичайно, всі роботи його учнів присвячені цій темі також. Серед активних учасників семінару є також учень Віталія Опанасовича, який представляє Запорізький національний університет - Ігор Вікторович Козін. Він сьогодні займається фрагментарними алгоритмами, що створює нову ланку в розвитку комбінаторних конфігурацій. На нинішньому семінарі також будуть представлені результати Антона Рябенко, Еліни Терещенко про дизайн змагань як інструмент для побудови сильної команди, що спираються на фундамент багатокритеріальної комбінаторної оптимізації.

Також хочу привітати всіх учасників нашого семінару від імені Володимира Євгеновича Бахрушина, який є професором кафедри системного аналізу а також головою вченої ради Запорізької політехніки, на жаль він не зміг бути присутнім, але передавав всім щирі вітання.

Бажаємо всім продуктивної роботи на семінарі та натхнення на нові дослідження і результати.

Анна Бакурова, д.е.н., професор, професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики НУ «Запорізька політехніка»

Вітальне слово учасникам семінару від Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України

Перш за все мені приємно передати вітання учасникам семінару від Івана Васильовича Сергієнка, академіка, директора нашого інституту і академіка Хіміча Олександра Миколайовича, який є академіком-секретарем Відділення інформатики в нашій академії. В інституті дуже велика увага приділяється напряму, який є тематикою нашого семінару. Минулий семінар ми присвятили пам'яті Донця Григорія Опанасовича, який виніс суттєвий вклад в розвиток тематики цього семінару.

Трішки хотів би відмітити питання історії, зовсім пунктирно, що таке комбінаторні конфігурації. Це важлива сама по собі галузь не лише в математиці, але і в прикладних аспектах застосувань, ще додає їй ваги те, що це – фундамент для комбінаторної оптимізації, для математичних моделей і алгоритмів комбінаторної оптимізації. І цей напрям нині бурхливо розвивається. Самі комбінаторні конфігурації, як розділ дискретної математики, виникли в кінці 50-х років тому, чому сприяло появлення комп'ютерів. А вже на нинішньому етапі, коли з усіх сфер практичних застосувань йдуть запити на формалізацію, моделювання і розв'язування задач комбінаторної оптимізації, важливість напряму зростає ще більше.

Тому хотів би кілька слів сказати про внесок наших вчених, бо вчені нашої країни внесли суттєвий вклад в комбінаторну оптимізацію і, відповідно, і в розвиток теорії комбінаторних конфігурацій. До фундаторів я б відніс, перш за все, В.Михалевича, Н.Шора та І.Сергієнка, роботи, яких були опубліковані ще в кінці 50-х і на початку 60-х років минулого століття. Важливо підкреслити, що ці роботи мали міжнародний резонанс. Чого вартує тільки алгоритм послідовного аналізу і відсіювання варіантів Михалевича-Шора. Тому що з часом і закордоном вияснили, що він став предтечою методу Белмана, методу динамічного програмування, але був опублікований раніше.

Не можна в короткій доповіді розповісти про вклад вчених лише Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України. Маю думку, що дуже назріла потреба в написанні історії комбінаторної оптимізації в нас, в Україні. Так однією із перших книг по комбінаторній оптимізації була книга Марії Фадеївни Каспшицької та Івана Васильовича Сергієнка «Моделі і методи розв'язування на ЕОМ комбінаторних задач оптимізації», яка вийшла в 1981 році. А Біблія для тих, хто займається комбінаторною оптимізацією – книга Х.Пападімітріу і К.Стайгліца «Комбінаторна оптимізація: алгоритми і складність», вийшла через рік, у 1982 році (оригінальне видання), і

тільки в 1985 р. вона було перекладена в Радянському Союзі російською мовою. Цікаво відмітити, що ця зарубіжна монографія в 1998 р. була перекладена стереотипно, що є унікальним. Автори намагалися формально визначити, що ж таке комбінаторна оптимізація? У їх редакції задачі комбінаторної оптимізації – це такі, у яких простір розв'язків є скінченним чи можливо нескінченним зліченим простором. Формального означення, які саме нескінченні простори, в цій монографії дано не було. Тому заради спрощення стали розглядатися лише задачі на скінченних просторах. Нам вдалося розширити, а точніше – формалізувати цей аспект, ввівши поняття узагальнених комбінаторних конфігурацій. Цей підхід використовував введено К.Бержем ще в 60-х роках поняття абстрактної конфігурації, про що розповідалося на попередньому нашому семінарі.

Сфера комбінаторної оптимізації нині дуже бурхливо розвивається, наростає потік наукових публікацій і дуже різко змінюється "ландшафт" цієї науки. Актуальність семінару зараз зростає ще і тому, що наша країна перебуває в такій складній ситуації. Всі чули про наші прориви у розробленні та використанні дронів, безпілотників, але за цим стоять результати колосальних досліджень у сфері математичного моделювання, розроблення прикладних алгоритмів, зокрема, комбінаторної оптимізації, та базованих на них інтелектуальних інформаційних технологіях. Потреба є в розвитку нових і складніших комбінаторних конфігурацій, ніж ті першого і другого роду, якими нині користуються у більшості випадків. Варто відмітити, що навіть, якщо взяти одну прикладну тему – планування і реалізація місій безпілотників, то лише за цей період року уже опубліковано більше 3 тис. наукових публікацій. Це ще раз підкреслює актуальність і важливість тематики нашого семінару і я зичу всім учасникам плідної роботи. Синергетичний ефект проявляється якраз при спілкуванні дослідників. Ми, на жаль, не маємо можливості очно проводити семінар, але і така форма спілкування – це теж чудово.

Дякую організаторам семінару, вітаю з 125-річчям знаного Національного університету «Запорізька політехніка» і шановних його співробітників!

Зичу всім учасникам семінару успіху в роботі і в подальших дослідженнях. Головне, щоб ви отримали і задоволення від спілкування з колегами, і щоб наші результати були корисні Україні.

Гуляницький Леонід Федорович, член-кор. НАН України, д.т.н., старший науковий співробітник, завідувач відділом методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних ІТ Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України

Вітальне слово учасникам семінару від Запорізького національного університету

Вітаю всіх учасників нашого семінару дуже приємно вас бачити тут.

Дуже приємно, що це аж 27-й семінар. Хоч він і змінював свої назви, але завжди увага приділялась саме комбінаторним конфігураціям.

Леонід Федорович Гуляницький каже, що дуже важко проводити семінар кожного року, а я пам'ятаю, що на початку семінар проводився двічі на рік і людей там було дуже-дуже багато. Завжди були дуже інтересні доповіді і тому я хочу сказати велике спасибі всім організаторам, які сьогодні продовжують ту роботу, яку почали засновники цього семінару, про яких, звичайно, маємо пам'ятати завжди. Це Анатолій Якович Петренюк і Георгій Панасович Донець. Вони – молодці, вони на себе тягнули цей семінар і він став дійсно часткою наукового життя України. Я не знаю в Україні таких семінарів, які протягом 27 разів збирають науковців з України і інших країн. Практично з початку розвитку нашої країни ідуть ці семінари і кожен раз вони дуже інтересні, дуже красиві. Тому я ще раз привітаю наших учасників і мені хочеться додати, що тема семінару, який ми проводимо сьогодні, дійсно дуже-дуже важлива. Як сказав Леонід Федорович річ у тому, що сьогодні ми якраз переводимо дуже багато задач саме у розряд комбінаторних завдань, тому що комп'ютери вони ж працюють саме з дискретними системами і нам потрібно розв'язувати дискретні задачі в різних варіантах, а саме комбінаторні конфігурації дають нам величезну кількість задач, які сьогодні не розв'язані в сенсі існування ефективних алгоритмів. Є величезна кількість NP-повних, NP-важких задач, задач дійсно важких, вони є саме в цій тематиці в різних її напрямках і ці завдання мають інтерес не тільки, як задачі теоретичні, фундаментальні, але є дуже багато практичних застосувань цих завдань. Можна просто перелічувати годинами, які комбінаторні напрями, мають значення сьогодні. Про один я буду розповідати, але сьогодні скажу, як перехоплювати ті ж самі ракети і дрони. Звичайно, потрібно вести нагляд за всім простором, а що потрібно щоб вести нагляд за тим простором: по-перше, так розставити системи нагляду, щоб спочатку це було надійно; по-друге, щоб вони перекривали всі можливі напрямки. Насправді це задача комбінаторна і дуже важлива сьогодні задача. Задачі транспортної логістики теж пов'язані з комбінаторними конфігураціями. І можна перелічувати ще дуже-дуже-дуже багато

задач. Тому я вважаю, що ми робимо з вами важливе, дуже корисне діло і ми будемо і далі працювати в цьому напрямку.

Дуже приємно бачити, що тут є і всі наші старі знайомі, старі учасники і я так бачу по прізвищам що з'являються нові учасники. І, звичайно, я хочу додати ще тих учасників, які передають вам великий привіт: Максишко Наталія Костянтинівна, Курапов Сергій Всеволодович, які теж були причасні до цього семінару. На жаль сьогодні ми їх тут не бачимо, але вони є, вони знають про нас і вони, як кажуть, душею з нами.

Бажаю всього доброго для роботи цього семінару і бажаю щоб він продовжувався надалі. Окрема подяка організаторам Ані Бакурової, Марині Семенюті. Вони держать дуже міцно прапор семінару і проводять його навіть через ці тяжкі часи.

Всього нам найкращого і дуже хотілось би в найближчому майбутньому все ж таки зустрітися віч навіч.

Козін Ігор Вікторович, доктор фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри економічної кібернетики Запорізького національного університету.

Вітальне слово учасникам семінару від Центральноукраїнського національного технічного університету

Шановні учасники XXVII Міжнародного науково-практичного семінару «**Комбінаторні конфігурації та їхні застосування**», шановні колеги, вітаю вас від Центральноукраїнського національного технічного університету, кафедри вищої математики та фізики.

Цей семінар давно став частиною нашого наукового життя, об'єднуючи дослідників з різних регіонів та установ. Ми вдячні всім, хто підтримує та розвиває цю традицію. Його витоки пов'язані з Кропивницьким, початково семінар проводився на базі Державної льотної академії України, а з 2009 року – в Кіровоградському національному технічному університеті, але сьогоднішній його розвиток є результатом спільної, наполегливої праці багатьох установ і людей. Вагомий внесок зробили наші колеги з Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Особливу подяку висловлюємо колегам із Запоріжжя – саме їхня активна участь у непрості роки пандемії та війни допомогла зберегти традицію і дати семінару новий імпульс.

Завдяки підтримці всіх учасників семінару, він не лише зберіг свою динаміку, а й продовжує розвиватися, створюючи простір для плідної наукової взаємодії.

Цьогорічна зустріч відбувається у рік знакової події – 125-річного ювілею Національного університету «Запорізька політехніка». Щиро вітаємо колег із цим поважним ювілеєм і зичимо невичерпної енергії, стійкості, злагодженої командної роботи, нових наукових звершень та подальшого розвитку університету як потужного осередку освіти й науки. Бажаю всім цікавих обговорень, наукових відкриттів і натхнення для подальшої роботи. Нехай наші зустрічі і надалі будуть джерелом нових ідей і справжньої наукової співпраці.

***Семенюта Марина Фролівна**, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету*

**СЕКЦІЯ 1. КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ, ГРАФИ ТА
ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ НА НИХ**

**СЕКЦІЯ 2. АВТОМАТИ, СКІНЧЕННІ АЛГЕБРИ,
МАТЕМАТИЧНА ЛОГІКА І ТЕОРІЯ МНОЖИН, ТЕОРІЯ ІГОР І
ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, КОДУВАННЯ ТА
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ, ЇХНЄ ЗАСТОСУВАННЯ В РІЗНИХ
ГАЛУЗЯХ**

**РЕЗУЛЬТАТИ ОГЛЯДУ СТАТЕЙ ПРО РОЗВ'ЯЗАННЯ
ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Єгер М.Д.

Ужгородський національний університет

**RESULTS OF CRITICAL REVIEW OF THE PAPERS ON
SOLVING VEHICLE ROUTING PROBLEM**

YEGNER M. D

UZHGOROD NATIONAL UNIVERSITY

***Abstract.** The paper provides an overview of VRP and its variations and their examples in the real world. Provides an overview of the VRP concerned papers, surveys and research, approach to their taxonomy and provide highlights on the classification results.*

Задача маршрутизації транспортних засобів визначається як проблема розробки оптимальних маршрутів для парку транспортних засобів, які обслуговують набір клієнтів з одного або кількох депо, з урахуванням різних обмежень та метою мінімізації витрат або максимізації ефективності [1]. VRP має широке застосування в різних секторах економіки, включаючи логістику, транспорт, електронну комерцію, управління відходами, громадський транспорт, охорону здоров'я та виїзне обслуговування. Ефективна оптимізація маршрутів має значний вплив на зниження операційних витрат, покращення якості обслуговування та досягнення цілей сталого розвитку. VRP належить до класу NP-складних задач, що означає високу обчислювальну складність пошуку оптимальних рішень, особливо для її варіацій великого масштабу. У зв'язку з цим, для розв'язання VRP часто застосовуються наближені методи, серед яких особливе місце займають алгоритми ройового інтелекту [1].

Існує велика кількість варіантів VRP, які класифікуються за різними факторами, такими як обмеження на вантажопідйомність

(Capacitated VRP, CVRP), часові вікна (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW), забір та доставка (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery, VRPPD), наявність кількох депо (Multi-Depot VRP, MDVRP), можливість розділення доставки (Split Delivery VRP, SDVRP), періодична маршрутизація (Periodic VRP, PVRP), стохастичний попит (Stochastic VRP, SVRP) та інші. Ці варіанти виникають внаслідок включення реальних складнощів та специфічних вимог різних застосувань [1]. Важливо зазначити, що VRP можна розглядати як узагальнення задачі комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) [3].

Авторами [3, 4] проведено обширний аналіз статей, присвячених дослідженню VRP та їх розв'язання. Вони пропонують наступну таксономію джерел, що є адаптованою версією таксономії, запропонованої Eksioglu (2009). Вони виділяють п'ять основних тем (тип дослідження, характеристики сценарію, фізичні характеристики проблеми, інформаційні характеристики та характеристики даних), кожна зі своїми власними детальними категоріями та підкатегоріями (див. таблицю 1).

Таблиця 1.

Тип досліджень, характеристика сценарію, фізичні характеристики задачі, інформаційні та дані характеристики

Розділ	Підрозділ	Назва
1	1.1	Theory
	1.2	Applied methods
	1.2.1	Exact methods
	1.2.2	Classical Heuristics
	1.2.3	Metaheuristics
	1.2.4	Simulation
	1.2.5	Real-time solution methods
	1.3	Implementation documented
2	1.4	Survey, review or meta-research
	2.1	Number of stops on route
	2.1.1	Known (deterministic)
	2.1.2	Partially known, partially probabilistic
	2.2	Load splitting constraint
	2.2.1	Splitting allowed
	2.2.2	Splitting not allowed
	2.3	Customer service demand quantity
	2.3.1	Deterministic

	2.3.2	Stochastic
	2.3.3	Unknown
	2.4	Request times of new customers
	2.4.1	Deterministic
	2.4.2	Stochastic
	2.4.3	Unknown
	2.5	Onsite service/waiting times
	2.5.1	Deterministic
	2.5.2	Dependent
	2.5.3	Stochastic
	2.5.4	Unknown
	2.6	Time window structure
	2.6.1	Soft time windows
	2.6.2	Strict time windows
	2.6.3	Mix of both
	2.7	Time horizon
	2.7.1	Single period
	2.7.2	Multi period
	2.8	Backhauls
	2.8.1	Nodes request simultaneous pickups and deliveries
	2.8.2	Nodes request either linehaul or backhaul service, but not both
	2.9	Node/Arc covering constraints
	2.9.1	Precedence and coupling constraints
	2.9.2	Subset covering constraints
	2.9.3	Recourse allowed
3	3.1	Transportation network design
	3.1.1	Directed network
	3.1.2	Undirected network
	3.2	Location of addresses (customers)
	3.2.1	Customer on nodes
	3.2.2	Arc routing instances
	3.3	Number of points of origin
	3.3.1	Single origin
	3.3.2	Multiple origin
	3.4	Number of points of loading/unloading facilities (depot)
	3.4.1	Single depot
	3.4.2	Multiple depots

	3.5	Time window type
	3.5.1	Restriction on customers
	3.5.2	Restriction on depot/hubs
	3.5.3	Restriction on drivers/vehicle
	3.6	Number of vehicles
	3.6.1	Exactly vehicles
	3.6.2	Up to vehicles
	3.6.3	Unlimited number of vehicles
	3.7	Capacity consideration
	3.7.1	Capacitated vehicles
	3.7.2	Uncapacitated vehicles
	3.8	Vehicle homogeneity (Capacity)
	3.8.1	Similar vehicles
	3.8.2	Load-specific vehicles
	3.8.3	Heterogeneous vehicles
	3.8.4	Customer-specific vehicles
	3.9	Travel time
	3.9.1	Deterministic
	3.9.2	Function dependent (of current time)
	3.9.3	Stochastic
	3.9.4	Unknown
	3.10	Objective
	3.10.1	Travel time dependent
	3.10.2	Distance dependent
	3.10.3	Vehicle dependent
	3.10.4	Function of lateness
	3.10.5	Implied hazard/risk related
	3.10.6	Other
4	4.1	Evolution of information
	4.1.1	Static
	4.1.2	Partially dynamic
	4.2	Quality of information
	4.2.1	Known (Deterministic)
	4.2.2	Stochastic
	4.2.3	Forecast
	4.2.4	Unknown (Real-time)
	4.3	Availability of information
	4.3.1	Local

	4.3.2	Global
	4.4	Processing of information
	4.4.1	Centralized
	4.4.2	Decentralized
5	5.1	Data used
	5.1.1	Real-world data
	5.1.2	Synthetic data
	5.1.3	Both real and synthetic data
	5.2	No data used

Тип дослідження визначає статтю відповідно до змісту та може бути розділений на чотири категорії. Перша категорія, що складається з теоретичних статей, сприяє загальному розумінню VRP у всіх її аспектах. Друга категорія відноситься до методів, що були застосовані для розв'язування VRP. Точні методи дозволяють знайти глобальний оптимум. Однак вони часто дорогі в обчислювальному сенсі, тому що VRP (як і багато його варіацій) є NP-складними (Lenstra & Rinnooy Kan, 1981). Як результат багато авторів пропонують евристики. Автори пропонують у своїй таксономії, розрізняти класичні евристики та метаевристики. Статті, які пропонують методи вирішення в реальному часі, для вирішення динамічних або онлайн-ових VRP, класифікуються в останню підкатегорію. Третя категорія включає всі статті, що документують реалізацію підходів для розв'язання задачі VRP в реальному світі, тоді як остання категорія включає дослідження, огляди та мета-дослідження, які стосуються VRP.

Характеристики сценарію задають список умов для проблеми, що впливає на розв'язок не напряму. Проблеми фізичних характеристик виражаються через умови та обмеження задачі і напряму впливають на розв'язок.

Інформаційні характеристики - ця категорія розрізняє еволюцію, якість, доступність і обробку інформації. Еволюція інформації стосується того, як вхід VRP розкривається під час процесу маршрутизації. Коли вся інформація відома заздалегідь, VRP визначається як статична; однак часто вхідні дані розкриваються або оновлюються під час процесу (частково динамічного).

Характеристики даних вміщують методи розв'язання, що можна перевірити на даних реального світу, синтетичних даних (таких як дані порівняння чи екземпляри, створені автором), або на їх комбінації.

Результати класифікації 144 статей наведені авторами у розрізі проблем та фізичних характеристик наведені у таблиці 2. Оскільки кілька припущень зазвичай комбінуються (наприклад, часові вікна,

кілька депо та місткі транспортні засоби), категорії не виключають одна одну. Наведені результати свідчать про важливість наведених характеристик у літературі.

Таблиця 2.

Огляд статей в розрізі варіантів VRP у абсолютних та відносних значеннях.

Variant	Number of articles (total = 144)	Relative presence
CVRP (Capacitated)	128	88.89%
VRPTW (Time Window)	57	39.58%
HVRP (Heterogeneous)	27	18.75%
MDVRP (Multi Depot)	18	12.50%
VRPPB (Backhauls)	17	11.81%
SDVRP (Split Deliveries)	16	11.11%
DVRP (Dynamic)	15	10.42%
PVRP (Periodic)	14	9.72%
VRPSD (Stochastic Demands)	13	9.03%
VRRSPD (Simultaneous Pickup and Delivery)	12	8.33%
OVRP (Open)	9	6.25%
TDVRP (Time Dependent)	7	4.86%
MCVRP (Multi-Compartment)	5	3.47%
CCVRP (Cumulative)	3	2.08%

Очевидно, як зазначають автори [3, 4], що CVRP залишається найпоширенішим варіантом. Транспортні засоби рідко вважаються непридатними, за винятком випадків, коли одна одиниця попиту вважається незначною за розміром (наприклад, Ferrucci et al., 2013). Оскільки CVRP був популярний з моменту формулювання VRP як задачі, що видно з розділу, присвяченого йому Toth і Vigo (2002). За останні п'ять років з'явився як новий варіант CVRP – Cumulative CVRP: замість того, щоб мінімізувати загальну відстань (або час у дорозі) як ціль, він мінімізує суму часу прибуття до клієнтів (Ke & Feng, 2013;

Mattos Ribeiro & Laporte, 2012; Ngueveu et al., 2010). Зі 144 статей три статті стосуються цього варіанту (2% класифікованих статей).

Іншим популярним варіантом є VRP з часовими вікнами. Часові вікна зазвичай обмежені клієнтами (57 статей) і депо (30 статей). Жорсткі часові вікна залишаються найпопулярнішими (44 статті проти 13 статей, якщо прийняти м'які часові вікна). Gendreau та ін. (2008) також надають категоризовану бібліографію, де можна знайти найважливіші метаевристики для VRPTW.

Типи транспортних засобів, що специфічні для вантажу або для клієнта, не популярні в сучасній літературі, хоча деякі автори розглядають VRP з багатьма відсіками. Загалом автори відзначають тенденцію зростання популярності варіантів VRP, які включають припущення з реальних задач, відкритої VRP, динамічної VRP та залежної від часу VRP. Часто такі параметри реального життя, як транспортування готівки (Yan та ін., 2012), доставка невеликих пакетів (Stenger та ін., 2013), збір сміття (Kuo та ін., 2012) або соціальне законодавство щодо робочого часу водіїв (Rancourt та ін., 2013; Kok et al., 2010; Goel, 2009), спонукають дослідників розробити конкретне математичне формулювання, для якого потім пропонується підхід. На жаль, такі підходи зазвичай намертво прив'язані до певної проблеми, а деякі навіть спеціально адаптовані до певних екземплярів тесту.

Література

1. Daoriao Hao, Xinhua Mao, Yingtao Wei, Lu Sun, Yang Yang, Review of research on vehicle routing problems, Proc. SPIE 13018, International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2023), 130180Y, 14 February 2024, <https://doi.org/10.1117/12.3024185>
2. Kumar, S. and Panneerselvam, R. A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. Intelligent Information Management, 2012, # 4, P. 66-74., <https://doi.org/10.4236/iim.2012.43010>.
3. Braekers, Kris & Ramaekers, Katrien & Nieuwenhuysse, Inneke. (2015). The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review. Computers & Industrial Engineering. 99. 10.1016/j.cie.2015.12.007.
4. Tan, Shi-Yi & Yeh, Wei-Chang. (2021). The Vehicle Routing Problem: State-of-the-Art Classification and Review. Applied Sciences. 11. 10295. 10.3390/app112110295.

ЕВОЛЮЦІЯ ТОПОЛОГІЇ НЕЙРОМЕРЕЖ, ЩО КЕРУЮТЬ ПОВЕДІНКОЮ ЦИФРОВИХ ІСТОТ

Олексій Ізвалов

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті

TOPOLOGY EVOLUTION OF NEURAL NETWORKS WHICH CONTROL THE BEHAVIOUR OF DIGITAL CREATURES

Oleksii Izvalov

Robert Elvorti Economics and Technology Institute

Abstract. This paper models the behavior evolution of digital creatures with neural networks in a 2D cellular world. It introduces a JavaScript simulator available on GitHub, which examines how different mutations, such as changes in neural network topology, affect adaptation and survival. The study presents experimental results showing the self-organization of creatures and the evolution of their control networks' hidden layers and neurons based on environmental conditions and behavioral strategies.

Моделювання цифрових істот, їх поведінки та еволюції є предметом широкого кола досліджень. У значній частині таких досліджень поведінка істот моделюється з допомогою нейромережі [1]. Із застосуванням методів навчання нейромережі та генетичного програмування спостерігається зміна поведінки істот, здебільшого – у бік підвищення ефективності поставленої перед ними задачі [2].

У даній роботі розглядається моделювання істот, які існують на 2-вимірній площині, розбитій на клітинки. Симулятор реалізовано на JavaScript, що забезпечує його можливість роботи у веб-браузері. Він опублікований у вільному доступі на GitHub [3]. Світ населений населеному трьома типами живих істот. Рослини (зелені клітини) - статичні джерела енергії. Вони з'являються, накопичують умовну енергію "від сонця", можуть розмножуватися (створювати копії поруч). Тварини (сині клітини) – активні агенти, що витрачають енергію. Вони можуть рухатися та отримують енергію від з'їдання рослин. Хижаки (червоні клітини) – рухаються, витрачають енергію, та можуть тільки від поїдання тварин. Поведінкою кожної істоти керує її власна нейронна мережа (рис.1).

Час у симуляції іде дискретно. У кожен такт симуляції 27 входів нейромережі активуються наступним чином. Перші 24 входи отримують R, G та B компоненти кольору від кожної з 8 сусідніх клітин у околі Мура. Також входами мережі є власний поточний рівень голоду,

власний поточний рівень здоров'я та випадкове значення для внесення елементу стохастичності в поведінку.

Прихований шар нейромережі містить 15 нейронів. Виходів мережа має 8 які згруповані у дві групи: 5 та 3 нейрони. Найбільш активований нейрон першої групи визначає напрям руху істоти: стояти на місці, або виконати намір рухатися в одному з напрямків у околі фон Неймана. Найбільш активований нейрон другої групи визначає режим руху. Це може бути звичайний рух, рух з наміром з'їсти істоту у цільовій клітині або активація режиму захисту («панцира») від спроб інших істот з'їсти її у наступному такті симуляції.

Найменші витрати енергії тварина нестиме у випадку стояння на місці без активації спеціальних режимів. Найбільші витрати енергії – при русі із наміром з'їсти вміст цільової клітинки. При цьому, якщо даний режим активувався у коректній ситуації (у цільовій клітині дійсно є істота, що слугує їжею), то прибуток енергії від з'їдання значно переважає витрати. Якщо істота витрачає всю свою енергію, вона зникає. Якщо ж накопичує енергії вище певного рівня, вона народжує нащадка.

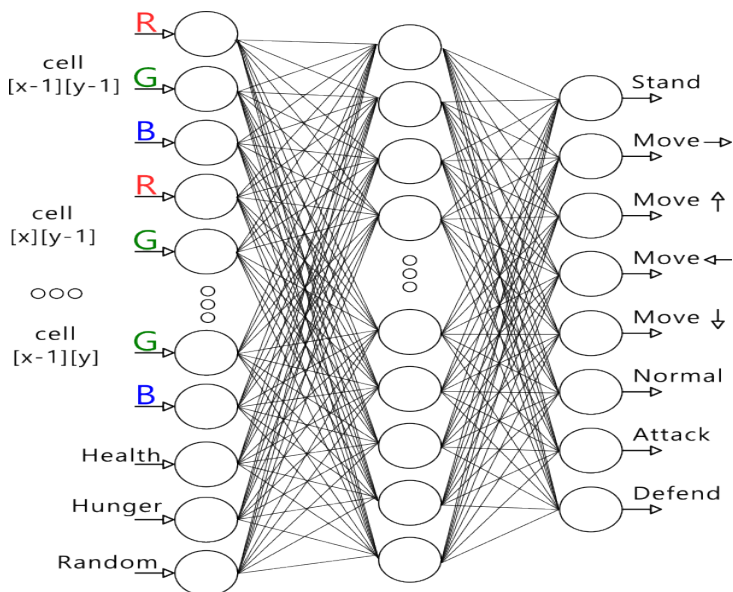


Рис. 1. Стартова структура нейромережі керування поведінкою тварин

Нашадки наслідують властивості батьків, при цьому існує 10% імовірність мутації. При мутації кольору нащадки як тварин, так і рослин отримують колір, який дещо відрізняється від батьківського. А мутація нейромережі змінює випадковим чином частину її вагових коефіцієнтів. Також існують мутації структури нейромережі. У симуляції закладено мутації чотирьох типів:

1. додавання нового нейрона на прихований шар мережі;
2. видалення випадкового нейрона з прихованого шару мережі (якщо на тому більше одного нейрона);
3. розділення одного шару мережі на два послідовних (якщо на цьому шарі більше одного нейрона);
4. об'єднання двох прихованих шарів мережі у єдиний шар.

Вагові коефіцієнти та власні активації нейронів також змінюються протягом життя істоти. Якщо поточна поведінка привела до отримання енергії, то вихідні значення, отримані в такі ситуації, підсилюються. Якщо ж істота довго голодає, це розцінюється як негативний сигнал для нейромережі та відбувається перебудова вагових коефіцієнтів з тим, щоб отримувати інші вихідні значення.

Натуральним чином в симуляторі відбувається природний відбір. Істоти, чії нейромережі генерують неефективні стратегії (не знаходять їжу, марно витрачають енергію), гинуть, не передавши нащадкам свої "гени". Якщо ж задані випадково на старті ваги мережі призводять до успішної стратегії (наприклад, рух до зелених клітин, коли рівень енергії низький, та економія енергії, коли ситий), істота виживає довше і накопичує достатньо енергії для розмноження.

Такий симулятор надає простір для широкого кола експериментів. Для першого експерименту світ було заселено універсальними істотами – здатними рухатися, отримувати енергію як від фотосинтезу так і від поїдання інших. При цьому параметри фотосинтезу були дорегульовані таким чином, що для повного забезпечення енергією істота має мати навколо 6 вільних клітин. При кількості сусідів більше ніж 2, починалося голодування, і щоб отримати достатньо енергії істота мала або рухатися, або атакувати сусідів.

Через деякий час моделювання істоти почали вибудовувати ланцюгоподібні структури (рис.2)

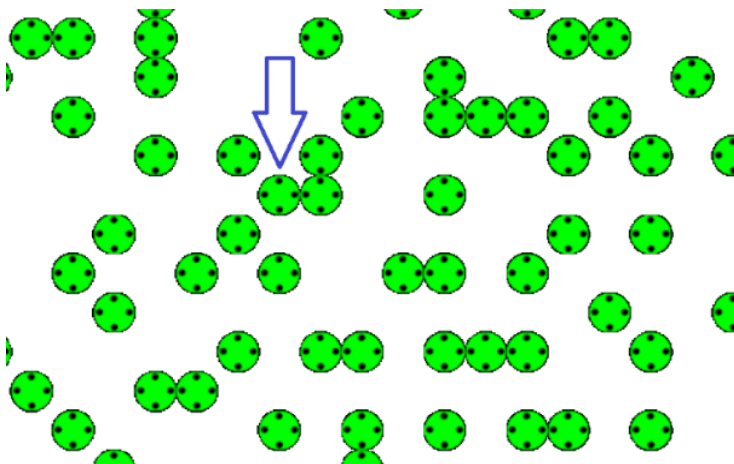


Рис.2. Самоорганізація універсальних істот (стрілкою відмічена та, що буде рухатися на наступному кроці)

Під час роботи симулятора через кожні 10 000 тактів моделювання виконувалися виміри щодо типів структур нейромереж істот. Імовірність мутації нейромережі у нащадка вкладала 10%. Під час мутації із рівними імовірностями у 20% структура нейромережі могла залишитися такою самою (тобто мутували тільки вагові коефіцієнти), або застосовувалася одна з чотирьох змін топології.

Після 2000000 тактів моделювання найбільша частина (40%) популяції універсальних істот мала нейромережу з трьома прихованими шарами (рис.3). Початкова топологія з одним прихованим шаром стабілізувалася на рівні 16% популяції. Нейромережі без прихованих шарів, у яких 27 вхідних нейронів безпосередньо поєднані з вісьмома вихідними, могли виникати внаслідок мутацій, проте, істоти із ними виявлялися непристосованими до існування.

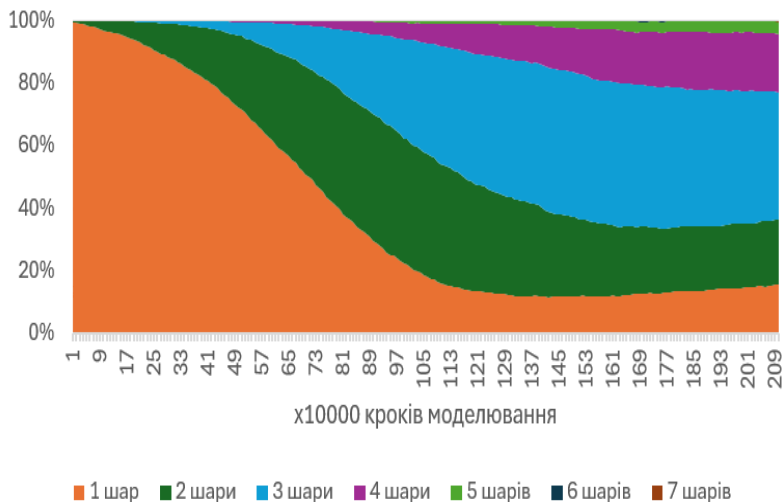


Рис.3. Зміна розподілу кількості прихованих шарів нейромереж популяції

Загальна кількість нейронів на внутрішніх шарах мереж (рис.4) мала тенденцію до змін як у бік збільшення, так і зменшення. Середньозважена кількість внутрішніх нейронів після 2 000 000 тактів моделювання складає 15,5. Найменша кількість нейронів, що спостерігалася при вимірах, була 10, проте, істоти з такими нейромережами існували спостерігалися лише при деяких вимірах у одиничній кількості і, найімовірніше, зникали, не залишивши нащадків.

Наступні експерименти на даному симуляторі полягали у вивченні еволюції нейромереж рухомих рослиноїдних істот (тварин) за умови рослин, що не рухаються та не відповідають на зовнішні збудники. У такому разі мутації із додатковими прихованими шарами зустрічалися рідше і, здебільшого не закріплювалися у нащадках. А кількість нейронів на єдиному прихованому шарі в еволюційно пристосованих тварин досягала 50-ти.

Але значна зміна картини спостерігалася, коли внаслідок мутації кольору рослини зменшили G-компоненту кольору. Тоді поведінка тварин змінилася на користь хаотичного руху «наосліп» і мутації з кількошаровими нейромережами вийшли на перше місце.

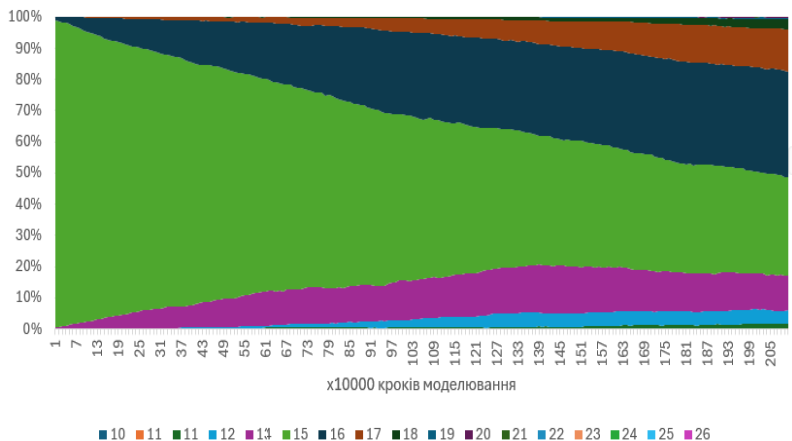


Рис.4. Зміна кількості нейронів на прихованих шарах нейромереж популяції

Висновки. Дане дослідження підтверджує, що відносно прості правила можуть генерувати складну поведінку цифрових істот та бути рушієм для штучної еволюції. Симулятор, вільно доступний на GitHub, може бути адаптований для серії аналогічних експериментів та візуалізації та дослідження створених в ході такої еволюції нейромереж.

Література

1. Taylor T, Auerbach JE, Bongard J, Clune J, Hickinbotham S, Ofria C, et al. WebAL Comes of Age: A review of the first 21 years of Artificial Life on the Web. *Artificial life*. 2016;22(3):364–407.
2. Joel Lehman (et al) The Surprising Creativity of Digital Evolution: A Collection of Anecdotes from the Evolutionary Computation and Artificial Life Research Communities arXiv:1803.03453 [cs.NE] 2018 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.03453>
3. Симулятор екосистеми на клітчастому полі: <https://github.com/GeneralVimes/AI/tree/main/EcoSystem> (дата звернення: 01.06.2025).

ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА З БАГАТЬМА РОЗВ'ЯЗКАМИ

Аніса Касім, Петро Стецюк, Ольга Хом'як

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України

TRAVELING SALESMAN PROBLEM WITH MANY SOLUTIONS

Anisa Kasim, Petro Stetsyuk, Olga Khomiak

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine

Abstract. Using the example of 57 settlements in the Kyiv region, whose Euclidean coordinates were calculated with an accuracy of one meter from geodetic coordinates, the problem of finding all Hamiltonian cycles for the symmetric traveling salesman problem is investigated. For the Euclidean and Manhattan metrics, optimal Hamiltonian cycles are given, which are obtained using the Concorde solver. A mathematical model of the traveling salesman problem with Miller-Tucker-Zemlin constraints and additional constraints that cut off the already found solutions is presented. It is used to prove that in the Euclidean metric, the Hamiltonian cycle is unique, and in the Manhattan metric there are two Hamiltonian cycles. The calculations were performed on the NEOS server using the CPLEX solver and the AMPL modeling language.

Задача комівояжера є однією з найбільш інтенсивно досліджуваних задач в комбінаторній оптимізації. Задача полягає в пошуку найкоротшого маршруту, що включає відвідування кожної вершини графа і повернення до початкової. Такий маршрут також називають найкоротшим гамільтоновим циклом.

Задача комівояжера формулюється таким чином. Нехай задана матриця $D = \{d_{ij}\}$, кожний її елемент d_{ij} , $i, j = 1, \dots, n$ – це відстань (вартість) переходу з вершини i у вершину j . Необхідно знайти таку перестановку цілих чисел від 1 до n , при якій досягається мінімум вартості маршруту (мінімальна довжина гамільтонового циклу).

Властивості вартісної матриці дозволяють класифікувати задачі комівояжера [1].

Означення 1. Якщо $d_{ij} = d_{ji}$ для будь-яких $i, j = 1, \dots, n$, то задача комівояжера називається *симетричною* задачею, інакше – *асиметричною*.

Означення 2. Нехай для будь-яких $i, j, k = 1, \dots, n$ має місце нерівність три-кутника $d_{ij} = d_{ik} + d_{jk}$. Тоді задача комівояжера називається *метричною* задачею.

Означення 3. Якщо d_{ij} є евклідовою відстанню для будь-яких i та j , то задача комівояжера називається *евклідовою* задачею.

Очевидно, що евклідова задача комівояжера буде також симетричною і метричною.

Задача комівояжера має численні прикладні застосування у логістиці, плануванні маршрутів, робототехніці, геоінформаційних технологіях тощо. Особливий інтерес викликає пошук всіх можливих оптимальних розв'язків, що важливо для побудови гнучких планів відвідування вершин у реальному часі засобами адаптивних геоінформаційних систем навігаційного типу.

У цьому дослідженні розв'язується задача побудови всіх оптимальних маршрутів (гамільтонових циклів) для симетричної задачі комівояжера. Розглянемо тестовий приклад з 57 населеними пунктами Київської області для евклідової та манхеттенської метрик. Наведемо оптимальні гамільтонові цикли, які отримані за допомогою солвера Concorde [2] з NEOS-сервера, та покажемо що в евклідовій метриці оптимальний гамільтонів цикл єдиний, а в манхеттенській метриці є два оптимальні гамільтонові цикли. Покажемо це за допомогою математичної моделі для задачі комівояжера з обмеженнями Міллера-Таккера-Земліна [3] та додатковими обмеженнями, які відсікають уже знайдені розв'язки.

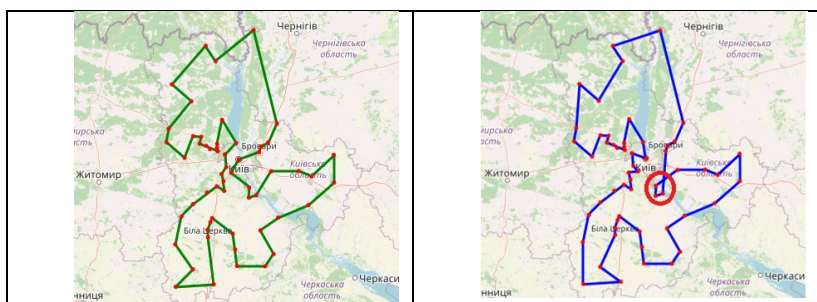


Рис.1 – Оптимальні маршрути: солвер Concorde, L2 (зліва) та L1 (справа)

Тестовий приклад для задачі комівояжера включає 57 населених пунктів Київської області, евклідові координати яких розраховано з точністю до метра за геодезичними координатами населених пунктів взятих з Wikipedia (Open Street Map) Були використані наступні населені пункти: Київ, Березань, Біла Церква, Богуслав, Бориспіль, Боярка, Бровари, Буча, Васильків, Вишгород, Вишневе, Ірпінь,

Кагарлик, Миронівка, Обухів, Переяслав, Прип'ять, Ржищів, Сквир, Славутич, Тараща, Тетіїв, Узин, Українка, Фастів, Чорнобиль, Яготин, Бабинці, Баришівка, Борова, Бородянка, Велика Димерка, Володарка, Ворзель, Глеваха, Гостомель, Гребінки, Димер, Дослідницьке, Згурівка, Іванків, Калинівка, Калинівська, Калита, Клавдієво-Тарасове, Кодра, Кожанка, Козин, Коцюбинське, Красятичі, Макарів, Немішаєве, Пісківка, Рокитне, Ставище, Терезине, Чабани.

Моделювання відстаней між вершинами здійснено у двох варіантах: евклідова метрика (L2): $d_{ij} = \text{round} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$; манхеттенська метрика (L1): $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$, де (x_i, y_i) , (x_j, y_j) – евклідові координати вершин.

Оптимальні маршрути, знайдені солвером Concorde для тестового прикладу з 57 населеними пунктами Київської області в обох метриках, наведено на рис. 1. В оптимальному маршруті за метрикою L1 має місце виділена червоним колом «петля». Це означає, що можна вказати як мінімум ще один оптимальний маршрут, у якому ця петля буде відсутня. Для пошуку усіх оптимальних маршрутів використовувалася описана нижче оптимізаційна задача.

Математична модель задачі комівояжера сформульована як задача змішаного цілочисельного лінійного програмування [3]. Потрібно мінімізувати цільову функцію:

$$d^* = \min_{x_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ji} = 1, \quad \sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$u_i - u_j + (n-1)x_{ij} \leq n-2, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq 1, j \neq 1, i \neq j; \quad (3)$$

$$x_{ij} = 0 \vee 1, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (4)$$

Тут булева змінна x_{ij} дорівнює одиниці, якщо цикл містить дугу (i, j) , та дорівнює нулю в протилежному випадку. Неперервна змінна u_i відповідає за порядок відвідування вершин, окрім першої вершини, з якої починається та в якій закінчується гамільтонів цикл. Чим більше значення змінної u_i в оптимальному розв'язку, тим пізніше цю вершину відвідує комівояжер.

Змінна u_i може цілочисловою $u_i \in Z$, де Z - множина цілих чисел, і задовольняти нерівності $1 < u_i \leq n-1$, $i = \overline{1, n}$, $i \neq 1$. У цьому випадку u_i відповідає номеру кроку, на якому відвідується вершина i , окрім першої вершини. Той чи інший спосіб опису змінних u_i може пришвидшити роботу вибраного солвера для розв'язання задачі (1)–(4).

Мінімізація цільової лінійної функції (1) відповідає знаходженню найкоротшого гамільтонового циклу, зв'язність якого забезпечують обмеження (3). Обмеження (2) описують одноразовий вхід у вершину i та одноразовий вихід з вершини i .

Для пошуку всіх оптимальних маршрутів на кожному кроці розв'язується модифікація задачі (1)–(4), де для запобігання вже знайденим оптимальним маршрутам використовується обмеження у такому вигляді:

$$\sum_{(i,j): x_{ijk}^* = 1} d_{ij} x_{ij} \leq d^* - 1/2, k = \overline{1, m}, \quad (5)$$

де d^* – оптимальне значення цільової функції (1), $X_k^* = \{x_{ijk}^*\}$ – знайдені k оптимальних маршрутів.

За допомогою задачі (1)–(5) доведено, що в евклідовій метриці гамільтонів цикл єдиний (див. рис. 1), а в манхеттенській метриці існує два гамільтонові цикли, які наведено на рис. 2.

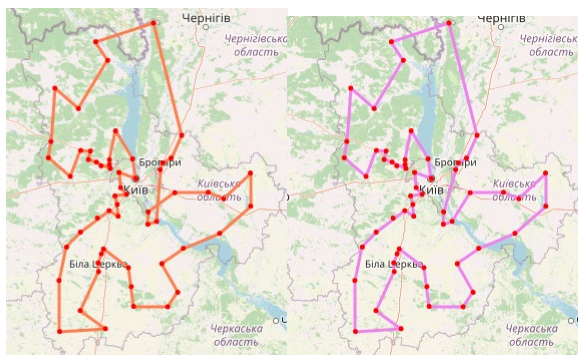


Рис.2 – Два оптимальних маршрути в метриці L1 (1399214 м)

Розрахунки проводилися на NEOS-сервері з використанням солвера CPLEX [4] та мови моделювання AMPL.

Література

1. Сергієнко І.В., Шило В.П., Рошин В.О. Дискретна оптимізація. Алгоритми та їхнє ефективне використання. Київ: Наукова думка, 2020. 144 с.

2. NEOS Solver Concorde. <https://neos-server.org/neos/solvers/co:concorde/TSP.html>

3. Стецюк П.И., Нуриев У.Г., Нуриева Ф.У. Новая модель целочисленного линейного программирования для задачи коммивояжера. Матеріали 7-ї Міжнародної наукової конференції "Математичне моделювання, оптимізація та інформаційні технології (ММОТИ-2021)", 15–19 листопада 2021 р. С. 319–325.

4. CPLEX Optimizer. High-performance mathematical programming solver for linear programming, mixed-integer programming and quadratic programming. <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>

ДЕЯКІ ВИПАДКИ ОДЕРЖАННЯ БІЦИКЛІЧНОЇ Т-ФАКТОРИЗАЦІЇ ПОВНОГО ГРАФУ МЕТОДОМ ПАРАЛЕЛЬНОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ МІЖДОЛЕВОГО РЕБРА

Мироненко О.В.

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті

SOME CASES OF OBTAINING A BICYCLIC T-FACTORIZATION OF A COMPLETE GRAPH BY THE METHOD OF PARALLEL TRANSFER OF AN INTER-SECTIONAL EAD

Myronenko O.V.

Robert Elvorti Economics and Technology Institute

Abstract. The work is devoted to the bicyclic T-factorization of the complete graph K_n , where $n = 4l+2$ and $l \geq 1$, and to the algorithm and method of parallel interlobular edge transfer when constructing such basic components of the bicyclic T-factorization.

It has been theoretically proven and practically shown on the examples of ten-vertex and fourteen-vertex complete graphs, which have a vertex with the highest degree of 5 and 7, respectively, that the proposed method, based on modulo residues and the use of parallel interlobular edge transfer, allows not only using a computer program, but also using a number of logical considerations and necessary constructions, to calculate all possible T-factorizations for complete graphs K_n , where $n = 4l+2$ and $l \geq 1$, with a large number of vertices n .

The author continues the investigation of the existence of a bicyclic T -factorization for the graph K_{18} using the parallel transfer of an interlobular edge.

Попередні дослідження [1, 2] ознайомлюють з основними поняттями та співвідношеннями, на яких базуються леми та їх доведення.

Наступні роботи [3-6], матеріали яких використано в дослідженнях біциклічної T -факторизації повного графу K_n , де $n = 4l+2$ і $l \geq 1$, присвячені характеристичній базовій компоненті біциклічної T -факторизації, умовам її існування та складанню алгоритму і методу паралельного перенесення міждолевого ребра при побудові таких базових компонент біциклічної T -факторизації.

Сформульовано та доведено ряд лем, що стосуються необхідних і достатніх умов T -факторизації, а саме - доведено такі леми:

Лема 1. В біциклічній T -факторизації l ребер в кожній долі графу T правильно вписані.

Лема 2. В біциклічній T -факторизації множина різниць $(b_j - a_i) \pmod k$ повинна складати повну систему лишків по $\pmod k$.

У статтях [2, 3] з'ясовано і описано вигляд базової компоненти біциклічної T -факторизації:

1. Вона складається з двох долей $A = (1, 2, 3, 4, \dots, k)$, $B = (k+1, k+2, \dots, n)$;
2. Підграфи g_A і g_B правильно вписані;
3. Різниця кодів міждовікових ребер складає повну систему лишків по $\pmod k$.

Таким чином виявлені властивості біциклічної T -факторизації, які використано для того, щоб описати вигляд базової компоненти біциклічної T -факторизації. Розглянуто необхідні умови існування довільної біциклічної T -факторизації:

а) $n = 4l+2$ ($l \geq 1$), тобто в кожній долі l ребер повинні утворювати повний k -вершинний граф при послідовних $k-1$ циклічних підстановках $\alpha_1 = (1, 2, \dots, k)$ і $\alpha_2 = (k+1, k+2, \dots, 2k)$;

б) вказані l ребер повинні бути занумеровані спеціальним чином, щоб під дією підстановки α_1 не утворювались ребра-дублікати, а також ребра не повинні утворювати циклів.

Введене поняття паралельного перенесення міждовікового ребра.

Означення 1. *Паралельним перенесенням міждолевого ребра називається одночасне збільшення кодів його вершин на постійну величину.*

Складено алгоритм побудови всіх базових компонент біциклічної T -факторизації для довільних значень $n=4l+2$.

Загальна схема алгоритму побудови:

1. Граф розбивається на дві долі з вершинами $A = (1, 2, 3, 4, \dots, k)$, $B = (k+1, k+2, \dots, 2k)$.

2. Будується підграф g_A таким чином, щоб вершина 1 мала максимальний степінь. Якщо це не так, то згідно з Лемою 1, це можна зробити за допомогою підстановки $\alpha_1 = (1, 2, \dots, k)$.

3. Інші ребра, інцидентні вершинам долі A , ідуть у міждолеві ребра і починається перебір їх кінцевих вершин. Перебір ведеться за умови, що різниці кодів складають повну систему лишків по $\text{mod } k$.

4. У долі B добудовується підграф g_B з умовою неутворення циклу і правильності вписування.

5. Якщо вершина 1 суміжна з будь-якою вершиною долі B , то згідно з Лемою 1 можна зробити так, щоб її номер став дорівнювати $k+1$ за допомогою підстановки $\alpha_2 = (k+1, k+2, \dots, n)$. За цих умов виконується перебір підграфів g_B .

Таким чином, у наведеному переліку робіт автора, та на основі доробку його попередників, розроблено та теоретично обґрунтовано новий метод одержання біциклічної T -факторизації повних графів з $n=4l+2$, де $l \geq 1$, який названо *методом паралельного перенесення міждолевого ребра*.

Досліджено дію алгоритму побудови всіх базових компонент біциклічної T -факторизації для довільних значень $n=4l+2$ та методу паралельного перенесення міждолевого ребра на прикладі $n=10$ для тих дерев, які включають вершину з найвищим степенем $k=5$, та для яких $l=2$. Розписані послідовно всі варіанти, що одержуються при побудові підграфів з використанням методу паралельного перенесення міждолевого ребра.

Розглянуто всі можливі тривершинні і чотиривершинні підграфи g_A (а також g_B), які можуть виникати в долі A . При цьому вершина 1 входить обов'язково в g_A (рис. 1).

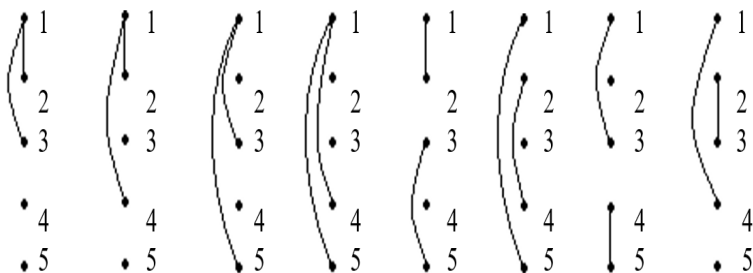


Рис. 1 - Типи підграфів $g_A(g_B)$ для $n=10$

Доведено теорему про те, що базова множина вичерпує всі типи можливих підграфів і з'ясовано, що, у підсумку, три базових графи h_1 , h_2 , h_3 , схематичні зображення яких наведені на рис. 2, дозволяють побудувати біциклічну T -факторизацію повного графу K_{10} .

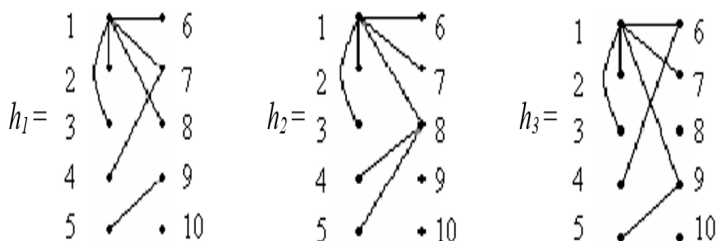


Рис. 2 - Базові графи, що дозволяють побудувати біциклічну T -факторизацію повного графу K_{10} .

Показано, що графи T_{15} , T_{17} , T_{19} , T_{61} , T_{62} , T_{66} і T_{78} не допускають біциклічної T -факторизації. Тим самим завершено доведення тверджень про існування біциклічних T -факторизацій повних графів з кількістю вершин $n=10$, що мають вершину степеня 5.

Так само, за допомогою алгоритму побудови всіх базових компонент біциклічної T -факторизації для довільних значень $n=4l+2$ та методу паралельного перенесення міждолевого ребра, виконано перебір усіх графів, які допускають біциклічну T -факторизацію повного графу з $n=14$, і які мають вершину з найвищим степенем 7.

У роботі [6] сформовано повний список 3159 неізоморфних дерев порядку $n=14$. Множину допустимих дерев, яких рівно 3081 дерево,

розбито на 6 класів $T[14, s]$, де $s=2, \dots, 7$. Кожен такий клас складається з дерев порядку 14, для яких найвищий степінь вершини $\Delta(T)=s$.

Автором розглянуто клас $T[14, 7]$, який складається з 127 дерев порядку 14 з максимальним степенем вершини $\Delta(T)=7$. В докторській дисертації А. Я. Петренюка [6] сформульовано і доведено ряд тверджень і теорем про існування та неіснування біциклічних T -факторизацій для дерев з класу $T[14, 7]$:

1) якщо дерево T допускає біциклічну T -факторизацію для $n=2k$, то вектор $d(T)=(d_1, d_2, \dots, d_k)$, де d_i – кількість вершин степеня i у дереві T , може бути представлений у вигляді суми двох таких векторів $d_1=(d_1(1), \dots, d_k(1))$ і $d_2=(d_1(2), \dots, d_k(2))$ з невід'ємними цілими компонентами, що при $j=1, 2$ виконуються співвідношення

$$d_1(j) + \dots + d_k(j) = k,$$

$$d_1(j) + 2 d_2(j) + \dots + k d_k(j) = n-1;$$

2) якщо дерево T з класу $T[14, 7]$ допускає біциклічну T -факторизацію, то одна з вершинних орбіт групи $\{a\}$ обов'язково включає 6 кінцевих вершин базової компоненти і одну вершину найвищого степеня 7;

3) якщо дерево T з класу $T[14, 7]$ допускає біциклічну T -факторизацію, то справедливі співвідношення

$$d_1 \geq m(T) + 3 \text{ і } m(T) \geq 3,$$

$$g(T) \leq 3 \text{ і } d_1 = 6 + m(T) - g(T), \text{ де}$$

$m(T)$ – кількість кінцевих вершин, суміжних з вершиною найвищого степеня 7,

$g(T)$ – кількість ребер у підграфі, породженому множиною вершин, степені яких не дорівнюють 1 чи 7 (тобто вершин з проміжними степенями);

4) якщо для дерева T з класу $T[14, 7]$ виконується нерівність $g(T) > 3$, то не існує біциклічної T -факторизації;

5) у класі $T[14, 7]$ не менше 17 дерев не допускають біциклічних T -факторизацій;

6) рівно 91 дерево з класу $T[14, 7]$ допускає біциклічні T -факторизації.

Подальші дослідження проведено з урахуванням усіх сформульованих умов існування та неіснування біциклічних T -факторизацій для дерев з загальною кількістю вершин $n=14$, які мають вершину степеня 7, і результатів побудов наведених в [5].

Всі можливі типи підграфів $g_A(g_B)$, що будуються в долі A та в долі B для дерев з кількістю вершин $n=14$ можна представити так: перший тип включає 3 ребра, інцидентних одній вершині (тобто ребра пов'язують між собою 4 вершини), другий тип – два ребра

інцидентних одній вершині і одне окреме ребро (підграф включає 5 таких вершини) і, відповідно, третій тип включає три окремих ребра (6 вершин).

Схематично всі можливі типи підграфів $g_A(g_B)$ можна представити так, як показано на рис. 3 і вважати їх основними базовими типами підграфів $g_A(g_B)$ для $n=14$.

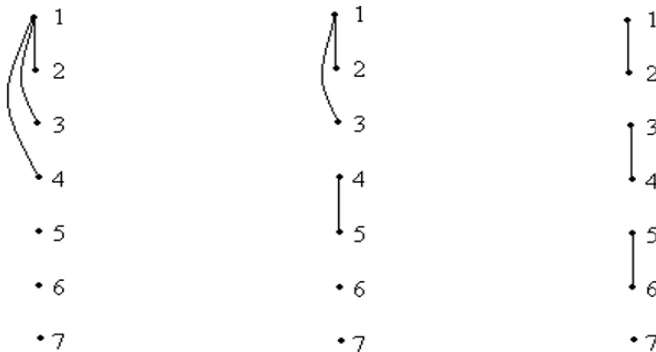


Рис. 3 - Основні типи підграфів $g_A(g_B)$ для $n=14$

Таким чином теоретично доведено та практично показано на прикладах десятивершинних та чотирнадцятивершинних повних графів, які мають вершину з найвищим степенем відповідно 5 та 7, що запропонована методика, основана на лишках по модулю та використанні паралельного перенесення між долевого ребра [2], дозволяє не тільки за допомогою комп'ютерної програми, але і за допомогою низки логічних міркувань та необхідних побудов, прорахувати всі можливі T -факторизації для повних графів K_n , де $n = 4l+2$ і $l \geq 1$, з достатньо великою кількістю вершин n .

Автор продовжує дослідження існування біциклічної T -факторизації для графа K_{18} методом паралельного перенесення між долевого ребра.

Для початку, була виконана спроба побудувати та занумерувати всі можливі графи-дерева з $18=4*4+2$ вершинами, де коренева вершина має степінь 9. Отже, кількість ребер такого графу $18 - 1 = 17$. Корінь під'єднаний до 9 підграфів-дерев. Нехай розміри цих піддерев – $s_1, s_2, \dots, s_9$. Тоді

$$s_1 + s_2 + \dots + s_9 = 17 \text{ (усі вершини, крім кореня).}$$

Знаходження всіх розбиттів числа 17 на 9 додатних цілих частин відомо як композиції числа 17 на 9 додатків. Кожна така композиція —

це варіант розподілу решти вершин між піддеревами. Таким чином, композиції 17 на 9 додатків — це кількість цілих додатних розв'язків рівняння:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_9 = 17 \quad x_i \geq 1.$$

Одержується $C_{16}^8=12870$ варіантів, які потрібно помножити на кількість підграфів-дерев. Комбінуємо ці 9 піддерев у дерево, під'єднавши їх до кореня та занумеруємо кожне дерево унікально.

Якщо для кожного числа s_i знайти кількість непорядкованих дерев $T(s_i)$, перемножити кількість варіантів цих дерев $T(s_1) \cdot T(s_2) \cdot \dots \cdot T(s_9)$ та просумувати всі можливості по всіх композиціях, то знайдемо кількість усіх можливих дерев з 18 вершинами, де корінь має степінь 9. Таких дерев 39 096.

Усі дерева можна згенерувати через рекурсивну побудову.

Література

1. Donets G.P., Myronenko O.V. (2010). Pro neobkhdni umovy T-factoryzatsiyi povnykh hrafiv [On the necessary conditions for T-factorization of complete graphs]. Kombinatorni konfiguracyi ta yikh zastosuvannya: dev'yaty mizhvuzivs'kyi naukovopraktychnyy seminar, 16-17 kvitny: zbirka materialiv, 35-39, [In Ukrainian].

2. Donets G.P., Myronenko O.V. (2011). Pobudova bazovykh komponent bitsyklichnoyi T-factoryzatsiyi za dopomohoyu bazovykh hrafiv [Construction of basic components of bicyclic T-factorization using basic graphs]. Kombinatorni konfiguracyi ta yikh zastosuvannya: odyadtsyaty mizhvuzivs'kyi naukovopraktychnyy seminar, 15-16 kvitny: zbirka materialiv, 49-56, [In Ukrainian].

3. Petreniuk L.P., Petreniuk A.Ya., Myronenko O.V. (2005). Neisnuvannya T-factoryzatsiy dlya deyakykh klasiv derev [Non-existence of T-factorizations for some classes of trees]. Pytannya prykladnoyi matematyky i matematychnoho modelyuvannya: Zbirn. nauk. prats', 213-219, [In Ukrainian].

4. Myronenko O.V. (2006). Novi rezul'taty u typoviy zadachi isnuvannya T-factoryzatsiy poryadku 10 [New results in the typical problem of the existence of T-factorizations of order 10]. Visnyk Ternopil'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: nauk. Zhurnal, 116-125, [In Ukrainian].

5. Petreniuk A.Ya. (2002). Neobkhdni umovy isnuvannya T-factoryzatsiy [Necessary conditions for the existence of T-factorizations]. Dopovidi NANU, 3, 71-73, [In Ukrainian].

6. Petreniuk A. Ya. (2002). Ekstremal'ni rozklady povnykh hrafov: isnuvannya, perelik [Extremal decompositions of complete graphs: existence, list]. Kyiv: Doktors'ka dysertatsiya, 266s., [In Ukrainian].

ПЛАНАРНІ ГРАФИ З НАПЕРЕД ЗАДАНОЮ КЛІТКОВОЮ ДОВЖИНОЮ ЗАДАНОЇ МНОЖИНИ ТОЧОК

Петренюк В. І., Петренюк Д. А.

Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький,
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

PLANAR GRAPHS WITH A PRE-GIVEN CELL LENGTH OF A GIVEN SET OF POINTS

Petrenjuk V.I.*, Petrenjuk D.A.

*Central Ukrainian National Technical University
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*

Abstract. The paper considers a method for constructing finite planar graphs from a given set of graphs G_i with subsets M_i of the set of their points, which have a given cell length and a fixed reachability number, and are minimal relative to a given cell distance length during operations of deleting an edge or point from a given set of graph points.

Анотація. В роботі розглянуто метод побудови скінчених площинних графів із заданої множини графів G_i з підмножинами M_i множини їх точок, які мають задану кліткову довжину і фіксоване число досяжності, та є мінімальними відносно заданої довжини кліткової відстані при операціях видалення ребра чи точки заданої множини точок графа.

Ключові слова: φ-перетворення графів, межі неорієнтованого роду графа, кліткова відстань, число досяжності заданої множини

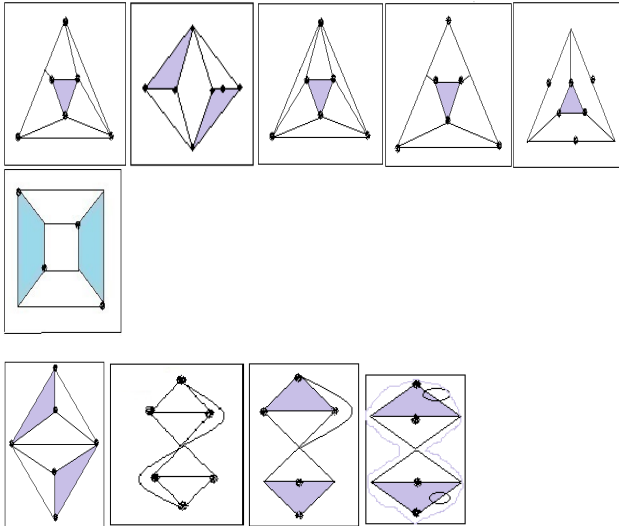
Вступ. Основні визначення та позначення узяті з [1–3]. В [4] розглянуто задачу дослідження властивостей площинних графів, що є мінімальними відносно заданої множини точок із заданою клітковою довжиною і числом досяжності заданої підмножини множини точок. Задачею статті є альтернативний підхід до опису деяких класів графів,

досліджених авторами в [4], де наведено всі інші позначення і визначення разом з пояснення до них.

Теорема. Нехай задано зв'язний площинний граф G із заданою множиною M точок суттєвих відносно кліткової відстані $d_G(M)$ при операції видалення з множини, $d_G(M) = d$, $d \geq 2$, з числом досяжності $t_G(M)$, $t_G(M) = t \geq 2$, та мінімальною відносно кліткової відстані множиною ребер при операції його видалення чи стискання в точку.

Мають місце наступні співвідношення:

1. Якщо $d_G(M) = 2$ та $t_G(M) = 2$, то граф G ізоморфний одному з графів:

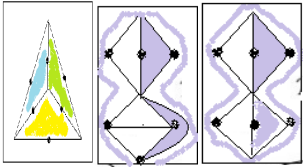


тобто є прообразом кільця з двома невідродженими простими циклами z_i , довжини $l(z_i)$, де $z_1 \cap z_2 = \emptyset$, $l(z_1) \geq l(z_2) > 3$, що задовольняють співвідношенню: д) вершини циклів z_1, z_2 , які

складають множину M , та пари вершин (v_1, v_2) циклів z_1, z_2 , відповідно, що з'єднані ребром, належать простим циклам довжини не більше 5.

та одній з наступних умов: а) $l(z_1) = 6, l(z_2) = 3$; б) $l(z_1) = 5, l(z_2) = 3$; в) $l(z_1) = 4, (l(z_2) = 4) \vee (l(z_2) = 3)$; г) $l(z_1) = 3, (l(z_2) = 4) \vee (l(z_2) = 3)$;

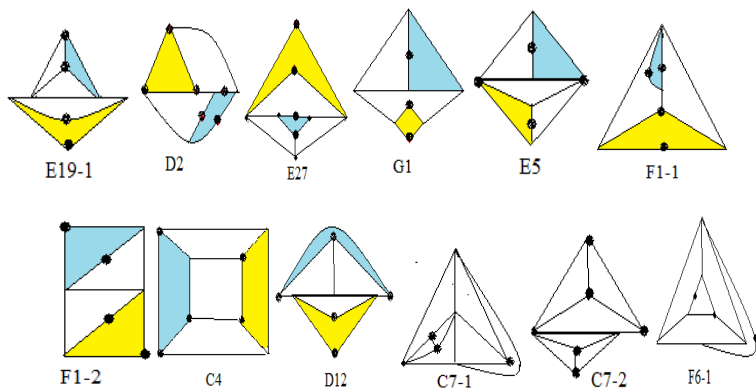
2. Якщо $d_G(M) = 2$ та $t_G(M) = 3$, то граф G ізоморфний одному з 3-х:



3. Якщо мають місце наступні умови:

а) множину точок M з числом досяжності $t_G(M) = t$, $t > 2$, розбито на $t-1$ непорожніх частин M_i , M_j , $M_i \cap M_j = \emptyset$, з клітковою відстанню довжини $D_G(M_1 \cup M_i)$, де $1 \leq D_G(M_1 \cup M_i) \leq 2$, для всіх $i < j$, $i, j = 1, 2, \dots, t-1$;

б) граф G подано як ϕ -образ k копій, щонайменше, двох графів H_{1i} , H_{1j} , ізоморфних одному з перших 11-ти графів H_{1i} , $H_{1i} = G(M_1, M_i)$, вищенаведених у лемі 2, заданим на парі простих ланцюгів $L_{H_{1i}}$, $L_{H_{1j}}$ графів H_{1i} , H_{1j} , де $i < j$, $i, j = 1, 2, \dots, k$, $k \leq t$ а саме:



то виконується нерівність:
$$D_G(M) - k \leq \sum_{i=1}^k D_G(M_1 \cup M_i)$$
, причому нижня оцінка досягнута для нез'язного графа G , всі компоненти якого є φ -образом пари графів K_4 при ототожненні пари ланцюгів довжини 2 та видаленням кратним ребром.

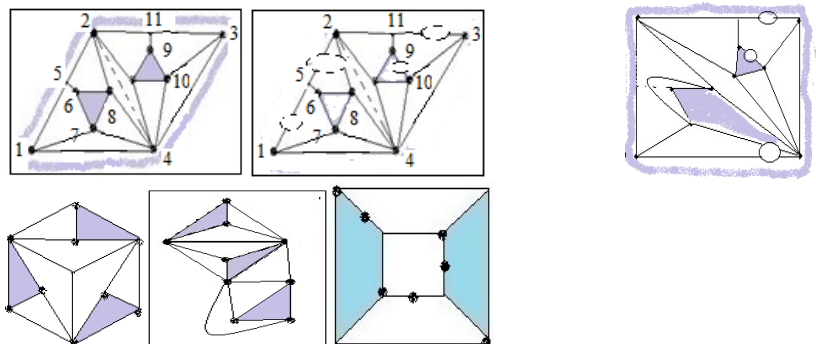


РИС. 1. Ілюструємо теорему графами із заданою множиною виділених жирно вершин заданої кліткової відстані.

Доведення теореми. Нехай для графа G виконуються умови теореми.

Доведемо співвідношення 1. Якщо $t_G(M) = 2$, то згідно визначення числа досяжності $t_G(M)$ множини матимемо вкладення графа G в евклідову площину, яке розбиває множину M на дві непусті підмножини M_i , розміщені на граничних циклах кліток s_i . Згідно визначення кліткової довжини $d_G(M) = 2$ кожна пара ребер (e_i, e_j) на границях пари кліток (s_i, s_j) має належати границі ще, хоча б, однієї клітки s_0 , причому ребра мають бути несуміжними. Дійсно, якщо припустити, що ребра (e_i, e_j) суміжні, тобто належать кліткам, які утворюють кут, то це означатиме, що $d_G(M) = 1$. Припущення неправильне. Оскільки граф – критичний відносно $d_G(M) = 2$ при видаленні чи стисканні у точку, то між (e_i, e_j) має бути або клітковий кут без пари (s_i, s_j) , або некутова 2-клітка s_0 , де $e_i \cup e_j \subset \partial s_0$. Тобто структура графа G є, або кільцем з двома зовнішнім та внутрішнім циклами, між якими лежать граничні цикли кутових кліток чи некутових, або клітковим ланцюгом з двома кінцевими невиродженими простими циклами z_i , $z_1 \cap z_2 = \emptyset$, з довжинами $l(z_i)$, де $l(z_1) \geq l(z_2) \geq 3$, між якими мають бути два кути з клітками s_i, s_j , що задовольняють одній з умов а), ..., г). 1-зв'язний граф G ізоморфний 9-му графу на рис. 2, де є приклади кліткового ланцюга та кільця. Якщо $t_G(M) = 3$, то згідно визначення числа досяжності $t_G(M)$ множини матимемо вкладення графа G у евклідову площину, яке розбиває множину M на три непусті підмножини M_i , розміщені на граничних циклах кліток s_i , $i = 1, 2, \dots, k$, $k = 3$. За визначенням кліткової довжини матимемо, щонайменше, три клітки, які містять на своїх границях непусті підмножини множини M . Можливі два випадки для $\theta_G(M)$: а) $\theta_G(M) = 1$; б) $\theta_G(M) = 0$. У випадку а) матимемо згідно

визначення кліткової довжини $d_G(M) = 2$ те, що границі кліток S_i, S_j, S_j матимуть хоча б одну спільну точку. Тоді наведені клітки утворюють два кліткові кути, які проходять через дві приклеєні стрічки Мебіуса. Враховуючи мінімальність графа G відносно $d_G(M)$, матимемо ізоморфізм графу K_4 з усіма 1-підрозділеними ребрами. У випадку б) матимемо, що дві пари кліток покриття множини M матимуть хоча б по одній спільній точці. Тоді 2-зв'язний граф G матиме структуру подібну до наведеної на останній карті рис. 4, а 1-зв'язний граф буде ізоморфний трьом останнім графам другого ряду на рис. 2. Доведення співвідношення 1 закінчено.

На рис.1 наведено граф із заданою множиною вершин, виділених жирно, на 1-й та 2-й карті без несуттєвого ребра (2, 4) відносно кліткової відстані 4 при операції видалення, а на третій карті встановлено суттєвість ребра (5, 6) відносно кліткової відстані 4 при операції видалення. На 4-й та 5-й картах площинні мінімальні графи відносно кліткової відстані 3 множини виділених вершин. На 6-й карті граф з множиною наведених точок кліткової досяжності 3 та мінімального при видаленні точки. Доведення теореми закінчено.

Література

1. Хоменко М. П. ф-перетворення графів. Препринт ИМ АНУ, Киев, 1973. 383 с.
2. Хоменко М. П. Топологические аспекты теории графов. Препринт ИМ АНУ, Киев, 1970. 299 с.
3. Mohar B., Thomassen C. Graphs on Surfaces. Johns Hopkins University Press, 2001. 412 p.
4. Петренюк В.І., Петренюк Д.А. Про синтез площинних графів із заданими властивостями. Кібернетика та комп'ютерні технології, №2, Інститут кібернетики НАНУ, Київ, 2025, С. 17-36. Режим доступу:
http://cctech.org.ua/ua/index.php?option=com_content&view=article&id=718:abstract-25-2-2-artu&catid=11:vertikalnoe-menyua&Itemid=101

**НЕОБХІДНА УМОВА ІСНУВАННЯ ЗБАЛАНСОВАНОЇ
СУМІЖНО-НУЛЬОВОЇ РОЗМІТКИ УЗАГАЛЬНЕНОГО ГРАФА
ПЕТЕРСЕНА**

Марина Семенюта

Центральноукраїнський національний технічний університет

**A NECESSARY CONDITION FOR THE EXISTENCE OF A
BALANCED ZERO-NEIGHBORHOOD LABELING OF A
GENERALIZED PETERSEN GRAPH**

Marina Semenuta

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi,
Ukraine

Abstract. Let $G = (V, E)$ be a graph of order $|V| = 2n$, and let $f : V \rightarrow \mathbb{Z}_2$ be a mapping such that the number of preimages of 0 and 1 are equal and for every vertex $v \in V$, its weight $w(v) = \sum_{u \in N(v)} f(u) \equiv 0 \pmod{2}$, where $N(v)$ is the neighborhood of v . Such the mapping f is called a balanced zero-neighborhood labeling. In this paper, a necessary condition for the existence of such a labeling for generalized Petersen graphs is established.

Розмітки графів елементами груп є активно досліджуваною областю теорії графів. Перші роботи цього напрямку з'явилися у 90-роках минулого століття. Вершинні розмітки графів елементами абелевих груп, при яких компоненти зв'язності графа мають сталу вагу, вивчали Ю. Фукучі [1] і Ю. Егава [2]. Розширення цієї ідеї призвело до введення Γ -магічної тотальної розмітки графа елементами довільної абелевої групи Γ , порядок якої залежить від порядку та розміру графа [3]. Γ -дистанційною магічною розміткою графа $G = (V, E)$ називають бієктивне відображення множини вершин V на абелеву групу Γ порядку $|V|$, при якому для кожної вершини з V сума міток суміжних з нею вершин дорівнює одному і тому ж елементу з Γ . Це поняття запропонував Д. Фрончек в роботі [4]. Граф, що допускає таку розмітку, називають Γ -дистанційним магічним. З точки зору наявності групових магічних розміток кубічні графи розглядалися в [5-8]. У цьому контексті, автори роботи [7] ввели новий тип розмітки вершин, який базується на двійкових мітках та локальних обмеженнях – це **збалансована суміжно-нульова розмітка** (balanced zero-neighborhood labeling). Вона тісно пов'язана з раніше досліджуваними видами розміток, що накладають обмеження на локальне оточення вершин. Зокрема, збалансоване суміжне розфарбування (neighborhood balanced coloring) [9] вимагає рівної кількості суміжних вершин кожного кольору

для кожної вершини, а розмітка з нульовою сумою (zero-sum labeling) [10] передбачає, що сума міток сусідніх вершин дорівнює нулю за певним модулем. **Збалансовану суміжно-нульову розмітку** можна розглядати як комбінацію цих ідей, оскільки вона вимагає як збалансованості кількості сусідів з різними двійковими мітками, так і нульової суми цих міток за модулем 2 в околі кожної вершини. Автори [7] досліджували наявність такої розмітки в узагальненому графі Петерсена $GP(n, 2)$ та сформулювали наступну задачу: охарактеризувати кубічні графи, що допускають **збалансовану суміжно-нульову розмітку**. В даній роботі вивчаються регулярні та узагальнені графи Петерсена $GP(n, k)$ у контексті даної тематики.

Під узагальненим графом Петерсена $GP(n, k)$ розуміємо граф порядку $2n$ з множиною вершин $V(GP(n, k)) = \{x_i, y_i : i \in Z_n\}$ та множиною ребер $E(GP(n, k)) = \{(x_i, x_{i+1}), (y_i, y_{i+k}), (x_i, y_i) | i \in Z_n\}$, де індекси беруться за модулем n ($n \geq 3$) і $1 \leq k < \frac{n}{2}$. При фіксованому n , заміна параметру k на $n - k$ не змінює структуру цього графу з точністю до перейменування вершин, тобто $GP(n, k) \cong GP(n, n - k)$. Підграфи C_1 і C_2 графа $GP(n, k)$ з множинами вершин $V(C_1) = \{x_i : i \in Z_n\}$, $V(C_2) = \{y_i : i \in Z_n\}$ і ребер $E(C_1) = \{(x_i, x_{i+1}) | i \in Z_n\}$, $E(C_2) = \{(y_i, y_{i+k}) | i \in Z_n\}$ будемо називати відповідно зовнішнім та внутрішнім циклами, а ребра виду (x_i, y_i) – спицями. Всі узагальнені графи Петерсена є кубічними графами. Підграф C_2 графа $GP(n, k)$ містить НСД(n, k) циклів порядку $\frac{n}{\text{НСД}(n, k)}$ [12]. При непарному k граф $GP(n, k)$ є дводольним.

Нехай G – граф з множиною вершин V , $|V| = 2n$. Розглянемо відображення $f : V \rightarrow Z_2$. Для кожної вершини $v \in V$ визначимо вагу $w(v) = \sum_{u \in N(v)} f(u)$. Відображення f називають збалансованою суміжно-нульовою розміткою графа G , якщо $|f^{-1}(0)| = |f^{-1}(1)| = n$ і $w(v) = 0$ для кожної вершини $v \in V$ [7].

S. Cichacz та S. Miklavic, встановили певні властивості цієї розмітки для підкласу графів $GP(n, 2)$. У наступній лемі сформульовано умови, яким мають задовольняти параметри n і r для r -регулярних графів.

Лема 1. Якщо r -регулярний граф G порядку n допускає збалансовану суміжно-нульову розмітку, то $n \equiv 0 \pmod{4}$ при $r \equiv 1 \pmod{2}$ і $n \equiv 0 \pmod{2}$ при $r \equiv 0 \pmod{2}$.

Наслідок 1. Якщо узагальнений граф Петерсена $GP(n, k)$ допускає збалансовану суміжно-нульову розмітку, то $n \equiv 0 \pmod{2}$.

У межах цієї роботи доведено наступну теорему, в якій представлено необхідні умови існування *збалансованої суміжно-нульової розмітки* для графів $GP(n, k)$.

Теорема 1. Якщо узагальнений граф Петерсена $GP(n, k)$ допускає збалансовану суміжно-нульову розмітку, то $n \equiv 0 \pmod{6}$, $k = 6l \pm 1$ або $n \equiv 0 \pmod{3}$, $k = 3s \pm 1$, де $l, s \in \mathbb{N}$.

Наведемо приклад застосування графів, що допускають збалансовану суміжно-нульову розмітку, до аналізу конкретної сенсорної мережі. Сенсорна мережа являє собою розподілену систему, що складається з автономних сенсорних вузлів, здатних сприймати різноманітні параметри навколишнього середовища (температуру, вологість, тиск, рух тощо) та обмінюватися інформацією для забезпечення комплексного моніторингу та прийняття рішень.

У дослідженнях розподілу станів сенсорів у мережах, топологія яких моделюється графами, важливо забезпечити як глобальну ефективність, так і локальну стабільність функціонування окремих вузлів. В якості математичної моделі такої сенсорної мережі розглянемо граф $GP(12,5)$, який разом зі збалансованою суміжно-нульовою розміткою представлений на рис. 1.

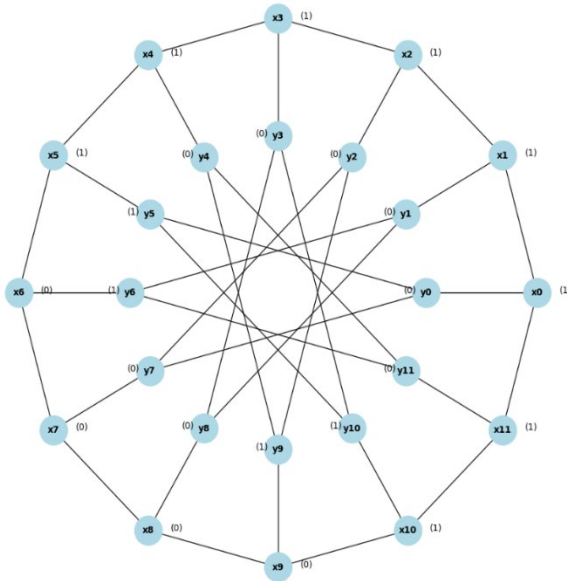


Рис. 1. Граф $GP(12,5)$ зі збалансованою суміжно-нульовою розміткою

У запропонованій моделі мітка 1 відповідає активному стану сенсорного вузла, а мітка 0 – пасивному. Застосування збалансованої суміжно-нульової розмітки дозволяє досягти наступні переваги: по-перше, глобальний баланс між активними та пасивними вузлами сприяє раціональному розподілу навантаження в мережі та ефективному використанню енергоресурсів – що є критично важливим для сенсорних систем із автономним живленням; по-друге, локальна умова $\sum_{i=0}^{11} w(x_i) = \sum_{i=1}^{11} w(y_i) \equiv 0 \pmod{2}$ може стабілізувати взаємодію між вузлами. Такий підхід направлений на збільшення тривалості роботи окремих вузлів і стабільності мережі в цілому. У межах функціонування сенсорної мережі таку конфігурацію станів корисно застосовувати на етапі ініціалізації або під час планової ротації активних вузлів, що забезпечує рівномірне використання ресурсів сенсорів. Крім того, локальний моніторинг умов балансу може використовуватись як механізм виявлення аномалій – зокрема, порушень у поведінці вузлів або несанкціонованих змін їхнього стану.

Література

1. Fukuchi Y. (1998). Graph labelings in elementary abelian groups. *Discrete Mathematics*. Vol. 189, Iss. 1-3. P. 117-122.
2. Egawa Y. (1997). Graph labelings in elementary abelian 2-groups. *Tokyo Journal of Mathematics*. Vol. 20, Iss. 2. P. 365-379.
3. Combe D., Nelson A. M., Palmer W. D. (2004). Magic labellings of graphs over finite abelian groups. *Australasian Journal of Combinatorics*. Vol. 29. P. 259-271.
4. Froncek D. (2013). Group distance magic labeling of Cartesian product of cycles. *Australasian Journal of Combinatorics*. Vol. 55. P. 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2019.111807>
5. Cichacz S. Fronček D. (2016). Distance magic circulant graphs. *Discrete Mathematics*. Vol. 339, Iss. 1. P. 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.disc.2015.07.002>
6. Cichacz S. (2018). Zero sum partition of Abelian groups into sets of the same order and its applications. *Electronic Journal of Combinatorics*. Vol. 25, Iss. 1.:#P1.20. DOI: 10.48550/arXiv.1702.07859.
7. Cichacz S., Miklavič Š. (2025). Group distance magic cubic graphs. arXiv:2503.01423 (math) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.01423>
8. Semeniuta M.F., Donets G.A. (2020). Group labeling of some graphs. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 56, Iss. 5. P. 701-709. DOI:10.1007/s10559-020-00287-w

9. Freyberg B., Marr A. (2024). Neighborhood Balanced Colorings of Graphs. *Graphs and Combinatorics*. Vol.40, Iss. 2. DOI: 10.1007/s00373-024-02766-9

10. Семенюта М., Олійник О. (2011). Збалансованість деяких видів графів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Том 16. № 4. С. 151-155.

11. Davis P. J.(1979) *On Circulant Matrices*. Wiley; 1st edition. 250 p.

SQUARE DIFFERENCE VERTEX LABELLING FOR THRESHOLD GRAPHS

Irene Sciriha, Zoia Sherman, and James L. Borg

Department of Mathematics, Faculty of Science, University of Malta, Msida MSD 2080, Malta

Abstract. The paper is devoted to the problem of constructing threshold graphs that admit such a labelling based on Laplacian eigenvalue-eigenvector considerations.

Vertex labelling is the assignment of integer labels so that no two vertices have the same label. Introduced in the mid 1960s, vertex labelling has remained a widely explored topic. Research in this area is regularly updated and expanded. In fact, there is an annual update of the review ‘A dynamic survey of graph labelling’ conducted by J. Gallian in the *Electronic Journal of Combinatorics* [1]. The article records the continual increase in the number of graph labellings techniques which has now exceeded 200 in over 3000 papers [1].

The interplay of the graph structure, graph labeling, and graph matrices calls for a unifying theory that clarifies poorly understood understanding areas in each discipline. Currently, the emergence of new labelings is accompanied by a range of unsolved problems. We believe that there is a great potential to produce new long-term benefits as that surpass the methods we used so far for solving problems of existence, construction, and enumeration of square difference labeling. An important problem that has cropped up recently is the assignment assigning of frequencies to AI-Controlled Drone Swarms by radio labelling . This involves labelling sites according to different priorities. A drone swarm, in this context, combines each unit function represented as a vertex in a graph , with the aim of maintaining communication with other drones through various frequency

channels. Intelligent drone swarms, which were neglected by military forces before, are a central component for both sides in contemporary conflicts. These swarms provide great support to infantry and artillery.

We consider finite undirected graphs without loops or multiple edges. A graph $G = (V, E)$ has vertex set $V(G)$ and edge set $E(G)$, where $|V| = n$ and $|E| = m$. The complement G^C of a graph G has the same vertex set as G and its edge set consists of the non-edges of G .

The same set of vertices induce a coclique in G^C .

Vertex labelling focuses on problems that primarily address the proof of the existence of specific types of labelling for various classes of graphs and the development of methods for their construction. The theory we develop here creates vertex labellings for the class of threshold graphs and one of its subclasses. It should be noted that the techniques found so far in the literature relate to number theoretical injective functions and also, in some cases, to some graph parameters. In this article, we develop new tools using Laplacian eigenvalue-eigenvector techniques that enable different vertex labellings to be derived easily from a concise encoding of a threshold graph.

The graceful labelling is the most commonly used vertex labelling.

More recently, another labelling called the *square difference labelling* (SD) has been studied which is number theoretical. We shall construct threshold graphs that admit such a labelling based on Laplacian eigenvalue-eigenvector considerations.

Definition 1. A function f is called a square difference labelling of a graph G if a function $f: V(G) \rightarrow 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ is bijective and the induced function $f^*: E \rightarrow N$ defined as $f^*(e = uv) = |[f(u)]^2 - [f(v)]^2|$ is injective.

Using the remarkable eigenvector structure of threshold graphs, we can identify a subclass of threshold graphs that admit an SD labelling compatible with their creation sequence.

Definition 2. A threshold graph on n vertices is defined by its binary creative sequence (BCS) $b_1, b_2, \dots, b_n$, where $b_1 = b_2$. An entry 0 represents the addition of an isolated vertex while an entry 1 means the addition of a dominating vertex. The entry b_n is 1 for a connected threshold graph.

Starting from an isolated vertex, a given BCS enables the construction of a unique NSG. The entry b_1 is 0 or 1 depending on whether the second vertex added to the first isolated vertex in the construction is an isolated or a dominating vertex, respectively. Successive common bits in the BCS correspond to a clique if equal to 1 and a coclique if equal to 0. Therefore a threshold graph is a split graph, that is a graph whose vertex set can be partitioned into a maximal clique and a coclique.

Definition 3. The minimal compact creative sequence (MCCS) $a_1, a_2, \dots, a_r$, is a sequence of positive integers, obtained from BCS $b_1, b_2, \dots, b_n$ defining a threshold graph $\mathcal{C}(a_1, a_2, \dots, a_r)$ on n vertices, such that $\sum_{i=1}^r a_i = n$, $a_1 \geq 2$, and for $1 \leq i \leq r$, a_i is the length of the i th subsequence of the same value (with each entry equal to 0 or each entry equal to 1) in BCS.

A threshold graph is a split graph, that is, its vertex set can be partitioned into two subsets, one inducing a maximal clique, the other a coclique. A split graph is known to be $2K_2, C_4$ and C_5 -free. Therefore a threshold graph is also referred to as a *nested split graph* (NSG).

Theorem 1. The only antiregular graphs for which the MCCS labelling is an SD labelling are those on 3, 4, 5 and 7 vertices.

Proof. As explained earlier, an antiregular graph is an NSG with one cluster containing two vertices (labelled 0 and 1), with all the other clusters containing one vertex.

For an antiregular graph on an even number of vertices, the cluster with vertices labelled 0 and 1 is a clique. The vertices labelled with an odd integer (greater than 1) form one-vertex cliques, and the vertices labelled with an even integer (greater than 0) form one-vertex cocliques. This means that for $n \geq 6$, the vertices labelled 4 and 5 are adjacent, as are the vertices labelled 0 and 3. Since $5^2 - 4^2 = 3^2 - 0^2 = 9$, this is not an SD labelling.

For an antiregular graph on an odd number of vertices, the cluster with vertices labelled 0 and 1 is a coclique. The vertices labelled with an odd integer (greater than 1) form one-vertex cocliques, and the vertices labelled with an even integer (greater than 0) form one-vertex cliques. This means that for $n \geq 9$, the vertices labelled 7 and 8 are adjacent, as are the vertices labelled 1 and 4. Since $8^2 - 7^2 = 4^2 - 1^2 = 15$, this is not an SD labelling.

The theorem has been proved.

We now state some sufficient conditions that guarantee that the labelling of an NSG induced by the MCCS is an SD labelling. We first note that for graphs on 5 vertices or less, any labelling is an SD labelling. We also recall that in the MCCS of an NSG, the first entry a_1 is at least 2.

Theorem 2. Let G be a nested split graph with $|V(G)| \geq 6$.

1. If the MCCS of G is $(a_1, a_2, \dots, a_j, m, 1)$ where $j \geq 2$, $a_1 + \dots + a_j \leq 3$ and $m \geq 1$, then the corresponding labelling is an SD labelling. (CHECK if EQUALS)

2. If the MCCS of G is $(a_1, a_2, \dots, a_j, m, 1)$ where $j \geq 2$, $a_1 + \dots + a_j = 4$ and $m \geq 1$, then the corresponding labelling is an SD labelling for $n \neq 6$.

3. If the MCCS of G is $(a_1, a_2, \dots, a_j, m, 1)$ where $j \geq 2$, $a_1 + \dots + a_j = 5$ and $m \geq 1$, then the corresponding labelling is an SD labelling for $n \neq 9$.

Proof. 1. The square differences are given by (a) a subset of $\{1,3,4\}$, and (b) $\{(n-1)^2 - i^2: i = 0,1, \dots, n-2\}$, where $n = |V(G)|$. All the square differences are distinct.

2. The square differences are given by (a) a subset of $\{1,3,4,5,8,9\}$, and (b) $\{(n-1)^2 - i^2: i = 0,1, \dots, n-2\}$, where $n = |V(G)|$. All the square differences are distinct when $n > 6$.

3. The square differences are given by (a) a subset of $\{1,3,4,5,8,9,12,15,16\}$, and (b) $\{(n-1)^2 - i^2: i = 0,1, \dots, n-2\}$, where $n = |V(G)|$. All the square differences are distinct when $n > 6$ and $n \neq 9$.

The theorem has been proved.

References

1. J. Gallian. (2023). A dynamic survey of graph labeling. The Electronic journal of Combinatorics, 1–712.

СПРОЩЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ БУЛЕВИХ ФУНКЦІЙ МЕТОДОМ ОБРАЗНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Михайло Соломко

Національний університет водного господарства та
природокористування

SIMPLIFICATION OF SYMMETRIC BOOLEAN FUNCTIONS BY THE METHOD OF FIGURATIVE TRANSFORMATIONS

Abstract. The object of the study is models of optimal logic circuits based on symmetric Boolean functions. The possibility of increasing the efficiency of the figurative transformation method for simplifying symmetric Boolean functions in the basic and polynomial bases has been established. Promising reserves of the method have been identified, such as the simplification of conjuncts of polynomial functions based on the method of inserting identical conjuncts with the subsequent operation of super-gluing variables. The extension of the figurative transformation method to the process of simplifying symmetric Boolean functions has been carried out using algebra in the part of the rules for simplifying functions in the basic and polynomial bases. Experimental studies have confirmed that the figurative transformation method, which uses the combinatorial systems 2-(n, b)-design and 2-(n, x/b)-design, increases the efficiency of simplifying symmetric Boolean functions. Compared with analogues, this makes it possible to

increase the productivity of minimizing symmetric Boolean functions by 100–200%. In applied terms, the method of figurative transformations for simplifying symmetric Boolean functions will ensure the transfer of innovations into material production: from conducting fundamental research, expanding the capabilities of digital component design technology to organizing serial or mass production of new products.

З огляду на практичну доцільність, як правило надають перевагу спеціальним класам булевих функцій, зокрема симетричним функціям (СФ) [1–3]. Завдяки своїм широким функціональним можливостям симетричні функції моделюють чималу кількість обчислювальних компонентів, зокрема, n -входові 1-розрядні суматори бінарних кодів або схеми (не)парності, компаратори, пристрої виявлення помилок, декодери завадостійких кодів тощо. З іншого боку, для синтезу симетричних функцій можна використати спеціальні, не властиві у загальному випадку часткові підходи, які переважно дають кращі результати щодо реалізації цифрових компонентів [4–6].

Булева функція $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ є симетричною відносно змінних $x_1, x_2, \dots, x_n$, якщо для будь-якої підстановки

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & k \\ x_1 & x_2 & \dots & k \end{pmatrix}$$

буде справедлива рівність

$$f(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_n) = f(x_{j_1}, \dots, x_{j_k}, x_{j_{k+1}}, \dots, x_{j_n}).$$

Зазвичай симетрія стосується перестановок параметрів об'єктів, які залишають його незмінним. Вони дають уявлення про структуру об'єкта, який може бути використаний для полегшення обчислень на ньому. Перестановки також можуть слугувати орієнтиром для збереження цієї структури, коли об'єкт певним чином трансформується. Таким чином симетрія для булевих функцій є перестановки змінних з можливим доповненням, які залишають значення функцій незмінними (рис. 1).



Виведення рівносильних перетворень поліномної функції способом вставки однакових кон'юнктерів

Виведення деяких рівносильних перетворень поліномної нормальної форми має наступний вигляд:

Оскільки четверта матриця сингулярна, у ній необхідно перейти до алгебри основного базису $\{\vee, \wedge, \neg\}$ та провести операцію напівсклеювання змінних.

$$\begin{aligned} \overline{x_1 x_2 x_3} \oplus x_1 x_2 x_3 &= 1 \oplus (x_1 \oplus x_2) + (x_1 \oplus x_3) = \overline{(x_1 \oplus x_2)} + \overline{(x_1 \oplus x_3)} = (\overline{x_1 \oplus x_2})(\overline{x_1 \oplus x_3}) = \\ &= (\overline{x_1} \oplus \overline{x_2})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_3}) = (x_1 \oplus \overline{x_2})(x_1 \oplus \overline{x_3}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} &= \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \\ &= 1 \oplus \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} = 1 \oplus \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 1 & & \\ 1 & 0 & & \\ 1 & 1 & 0 & \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} = 1 \oplus \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 1 & & \\ 1 & 0 & & \\ 1 & 1 & 0 & \\ 1 & 1 & & 0 \\ \hline \end{array} = 1 \oplus \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & & & 1 \\ 0 & & 1 & \\ 0 & 1 & & \\ 1 & 0 & & \\ 1 & & 0 & \\ 1 & & & 0 \\ \hline \end{array} = \\ &= 1 \oplus (x_1 \oplus x_2) + (x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4). \end{aligned}$$

Оскільки четверта матриця сингулярна, у ній потрібно обрати алгебру основного базису $\{\vee, \wedge, \neg\}$ та провести операцію напівсклеювання змінних. У п'ятій матриці також проводиться операція напівсклеювання змінних.

Отже:

$$\begin{aligned} \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus x_1 x_2 x_3 x_4 &= 1 \oplus (x_1 \oplus x_2) + (x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4) = \\ &= \overline{(x_1 \oplus x_2)} + \overline{(x_1 \oplus x_3)} + \overline{(x_1 \oplus x_4)} = (\overline{x_1} \oplus \overline{x_2})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_3})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_4}) = (\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4). \end{aligned}$$

Наступне рівносильне перетворення виводиться за індукцією.

$$\begin{aligned} \overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5} \oplus x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 &= 1 \oplus (x_1 \oplus x_2) + (x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4) + (x_1 \oplus x_5) = \\ &= ((x_1 \oplus x_2) + (x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4) + (x_1 \oplus x_5)) = (\overline{x_1 \oplus x_2})(\overline{x_1 \oplus x_3})(\overline{x_1 \oplus x_4})(\overline{x_1 \oplus x_5}) = \\ &= (\overline{x_1} \oplus \overline{x_2})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_3})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_4})(\overline{x_1} \oplus \overline{x_5}). \end{aligned}$$

Окремі приклади рівносильних перетворень ПНФ та ДНФ, за результатами процедури вставки однакових кон'юнктерів з наступною операцією супер-склеювання змінних, представлено у табл. 2 і табл. 3, відповідно.

Таблиця 2

Таблиця деяких рівносильних перетворень кон'юнктерів ПНФ

$\overline{x_1 x_2} \oplus x_1 x_2$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)$
$\overline{x_1 x_2 x_3} \oplus x_1 x_2 x_3$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)$
$x_1 \overline{x_2 x_3} \oplus \overline{x_1 x_2} \overline{x_3}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_2 \oplus x_3)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus x_1 x_2 x_3 x_4$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)$
$x_1 \overline{x_2 x_3 x_4} \oplus \overline{x_1 x_2} \overline{x_3 x_4}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_4)(x_2 \oplus x_3)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus x_1 x_2 x_3 \overline{x_4}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5} \oplus x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)(\overline{x_1} \oplus x_5)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6} \oplus x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)(\overline{x_1} \oplus x_5)(\overline{x_1} \oplus x_6)$

Алгебричні вирази у лівому стовпчику табл. 2 сингулярні [7], тому останні можна представити і в основному базисі $\{\vee, \wedge, \neg\}$ (табл. 3).

Таблиця 3

Таблиця деяких рівносильних перетворень мінтермів ДНФ

$\overline{x_1 x_2} + x_1 x_2$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)$
$\overline{x_1 x_2 x_3} + x_1 x_2 x_3$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)$
$x_1 \overline{x_2 x_3} + \overline{x_1 x_2} \overline{x_3}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_2 \oplus x_3)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} + x_1 x_2 x_3 x_4$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)$
$x_1 \overline{x_2 x_3 x_4} + \overline{x_1 x_2} \overline{x_3 x_4}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_4)(x_2 \oplus x_3)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} + x_1 \overline{x_2 x_3} \overline{x_4}$	$(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5} + x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)(\overline{x_1} \oplus x_5)$
$\overline{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6} + x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6$	$(\overline{x_1} \oplus x_2)(\overline{x_1} \oplus x_3)(\overline{x_1} \oplus x_4)(\overline{x_1} \oplus x_5)(\overline{x_1} \oplus x_6)$

Споглядаючи табл. 2 і табл. 3, бачимо, що логічна операція еквівалентності $\overline{x_1 x_2} + x_1 x_2$ є частковим випадком на множині подібних

рівносильних перетворень булевих виразів.

Спрощення симетричних булевих функцій в основному базисі методом образних перетворень

У загальному випадку СФ може мати декілька індексів. Наприклад СФ

$$H_3(1,2) = \overline{x_1 x_2 x_3} + \overline{x_1 x_2} \overline{x_3} + \overline{x_1 x_2} x_3 + \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} + \overline{x_1} x_2 x_3 + \overline{x_1} x_2 x_3, \quad (1)$$

має два індекси: $a=1$ і $a=2$. Тут набори змінних $\overline{x_1 x_2 x_3}$; $\overline{x_1 x_2} \overline{x_3}$; $\overline{x_1 x_2} x_3$ мають по одній 1, а набори змінних $x_1 x_2 \overline{x_3}$; $\overline{x_1} x_2 \overline{x_3}$; $\overline{x_1} x_2 x_3$ мають по дві 1. Оскільки індекси СФ (1) відрізняються на одиницю, можливою є операція склеювання змінних в основному базисі $\{\vee, \wedge, \neg\}$ [8].

Приклад 1. Методом образних перетворень спростити симетричну функцію $H_3(1,2)$ (1) [8]:

Розв'язок:

Представимо еквівалентну двійкову матрицю функції $H_3(1,2)$ у лексикографічному порядку та проведемо спрощення $H_3(1,2)$ у ДДНФ представлення з переходом до змішаного базису.

$$H_3(1,2)_{\min} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \\ 1 & 0 & \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = x_1 \oplus x_2 + x_1 \oplus x_3. \quad (2)$$

У першій матриці (2) проведено просте склеювання змінних, результат склеювання записано до другої матриці. У другій матриці (2) проведено напівсклеювання змінних, результат напівсклеювання змінних записано до третьої матриці.

МСФ функції $H_3(1,2)$ (2) у змішаному базисі має вигляд:

$$H_3(1,2)_{\min} = x_1 \oplus x_2 + x_1 \oplus x_3. \quad (3)$$

МСФ (3) представляє 2-рівневу логіку з ціною реалізації

$$k_0 / k_1 / k_n = 2 / 4 / 0,$$

що менше на два літерали, порівняно з [8].

З огляду на МСФ (3) видно, що перестановка змінних x_2 і x_3 не змінить значення функції. Таким чином мінімальна функція (3) у змішаному базисі має часткову симетрію змінних x_2 і x_3 .

Спрощення симетричних булевих функцій у поліномному базисі методом образних перетворень

Приклад 2. Застосовуючи спосіб вставки однакових кон'юнктерів з наступною операцією супер-склеювання змінних, спростити частково симетричну булеву функцію, що задана у канонічній формі [9]

$$f = (0, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15), \quad (4)$$

Розв'язок:

У поліномному форматі за допомогою Карти Карно у роботі [9] функцію (4) спрощено до виду:

$$f = x_1 \oplus x_2 x_3 \oplus x_2 x_4 \oplus x_3 x_4 \oplus x_1 x_2 x_3 x_4 \oplus \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4,$$

з ціною реалізації $k_0 / k_1 = 6 / 15$.

У роботі [10] цю ж функцію (4) спрощено до виду:

$$f = x_1 \oplus x_2 \oplus \bar{x}_2 x_3 x_4 \oplus \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \oplus x_1 x_2 \bar{x}_3 \oplus x_1 x_2 x_4,$$

з ціною реалізації $k_0 / k_1 = 6 / 14$.

Функція (4) у роботі [7] спрощена до такого виду:

$$Y_{\text{пнф}} = x_1 \oplus x_2 \oplus \bar{x}_3 \oplus x_4 \oplus \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}. \quad (5)$$

з ціною реалізації $k_0 / k_1 = 6 / 12$.

Застосовуючи до кон'юнктерів $\bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}$ функції (5) спосіб вставки однакових кон'юнктерів з наступною операцією супер-склеювання змінних, буде отримано:

$$\bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} = (x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4).$$

Спрощення функції (5) можна продовжити:

$$Y_{\text{пнф}} = x_1 \oplus x_2 \oplus \overline{x_3} \oplus x_4 \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} = x_1 \oplus x_2 \oplus \overline{x_3} \oplus x_4 \oplus (x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4) = \\ = \overline{x_3} \oplus x_4 \oplus (x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4) = (\overline{x_3} \oplus x_4) \oplus (x_1 \oplus x_2)((x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4)).$$

МСФ функції (4) буде мати вигляд:

$$Y_{\text{пнф}} = (\overline{x_3} \oplus x_4) \oplus (x_1 \oplus x_2)((x_1 \oplus x_3) + (x_1 \oplus x_4)). \quad (6)$$

Ціна реалізації МСФ (6) становить

$$k_0 / k_f / k_{in} = 2 / 8 / 3,$$

що на сім літералів менше, порівняно з [9].

Результатом безпосереднього спрощення кон'юнктерів $\overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}$ функції $Y_{\text{пнф}} = x_1 \oplus x_2 \oplus \overline{x_3} \oplus x_4 \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \oplus \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}$ способом вставки однакових кон'юнктерів з наступною операцією супер-склеювання змінних є вираз – $(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4)$. Далі проводиться поліномне поглинання змінних $x_1 \oplus x_2$ та $(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4)$ [7], результатом якого є вираз – $(x_1 \oplus x_2)(x_1 \oplus x_3)(x_1 \oplus x_4)$.

Література

1. Shannon C.E. A symbolic analysis of relay and switching circuits // Trans. AIEE. – 1938. – № 57. – Р. 713-723 (рус. перевод в сб. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – С. 9-45). URL:

<https://www.cs.virginia.edu/~evans/greatworks/shannon38.pdf>.

2. Авгуль Л.Б., Петроченко А.С. Декомпозиция симметрических булевых функций и булевых функций с частичной симметрией в базисе монотонных функций // Кибернетика и системный анализ. 1989. № 3. С.26–40. URL: <http://rntbcat.org.by/izobr/Avgul.htm>.

3. Sasao T. Logic synthesis and optimization // Kluwer Academic Publishers. 1993. P.233–252.

4. Свирищева Э. А. Структурный синтез неизоморфных систем с однородными компонентами. Харьков, 1998. 254 с.

5. Рицар Б.Є. До формалізації симетричних логічних функцій n змінних // Матеріали міжнар. конф. “Сучасні проблеми автоматизованої

обробки і виробництва радіоелектронних засобів застосування засобів зв'язку". Львів-Славськ, 1996. Ч.2. С.28–30.

6. Рижар Б.С. Декомпозиція булевих функцій методом q-розбиття. 1. // Управляющие системы и машины. 1999. № 5. С.29–42.

7. Solomko M., Batyshkina Iu., Khomiuk N., Ivashchuk Ya., Shevtsova N. Developing the minimization of a polynomial normal form of Boolean functions by the method of figurative transformations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- Vol. 2, No 4(110). 2021. – pp. 22–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229786. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/issue/view/13955>.

8. Паулин О.Н., Янко В.Г. О минимизации симметрических булевых функций. Конференция «MODERN PROBLEMS AND WAYS OF THEIR SOLUTION IN SCIENCE, TRANSPORT, PRODUCTION AND EDUCATION 2014». – Sworld. – 27–28 June 2014.

9. Tran A. Graphical method for the conversion of minterms to Reed–Muller coefficients and the minimization of exclusive-OR switching functions // IEEE Proc. – March 1987. – 134, Pt.E, N 2. – P. 93–99.

10. Rysar, B.Ye. New minimization method of logical functions in polynomial set-theoretical format. 1. Generalized rules of conjuncterms simplification // Управляющие системы и машины, № 2 [11], 2015, – С. 39–57. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87194>.

МЕТОДИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПРОБЛЕМИ ОБРОБКИ РЕТРОСПЕКТИВНИХ ДАНИХ

В.В. Шевченко

Національний університет «Запорізька політехніка»

STORAGE METHODS AND PROBLEMS OF PROCESSING RETROSPECTIVE DATA

V.V. Shevchenko

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Одним з основних методів зберігання ретроспективних даних є централізовані сховища даних, які дозволяють зберігати великі обсяги структурованої інформації, отриманої з різних джерел. Такі системи оптимізовані для аналітики та історичного аналізу, оскільки дані в них зазвичай зберігаються у вигляді знеособлених таблиць з уніфікованими структурами. У багатьох випадках використовуються сховища даних –

підсистеми зберігання, що обслуговують окремі бізнес-процеси або функціональні одиниці. Для роботи з неструктурованими або необробленими даними використовуються озера даних, які дозволяють зберігати інформацію в її первозданному вигляді. Хмарні рішення все частіше користуються перевагою, оскільки вони забезпечують гнучкість, масштабованість та легкість доступу до ретроспективної інформації. Для зберігання медичних, біологічних або наукових даних часто використовуються спеціалізовані сховища з високим рівнем безпеки та конфіденційності [1]. Вибір методу зберігання залежить від формату, обсягу та призначення даних. Якість та структура сховища безпосередньо впливають на подальшу можливість ефективного аналізу.

Обробка ретроспективних даних пов'язана з низкою проблем, насамперед з неоднорідністю форматів та джерел інформації [2]. Часто дані, зібрані протягом тривалого періоду часу, мають різні формати дат, одиниці вимірювання або назви змінних. В результаті виникає потреба в нормалізації та уніфікації даних, що передбачає приведення їх до єдиного стандарту. Складність обробки також пов'язана з наявністю відсутніх значень, дублікатів та помилок введення, що вимагає додаткової роботи на етапі очищення. У разі об'єднання даних з кількох джерел важливим кроком є побудова надійних ключів зв'язків для правильного об'єднання записів. Додаткові труднощі виникають під час роботи з історичними змінними, які мають змінне значення з часом (наприклад, посади, адреси, обмінні курси). Аналіз ретроспективної інформації також може бути ускладнений обмеженнями доступу до повних або первинних даних, особливо коли йдеться про особисту або конфіденційну інформацію. Крім того, важливо враховувати контекст збору даних, щоб уникнути неправильних інтерпретацій.

Ще однією суттєвою проблемою є систематична помилка вибірки, яка може призвести до спотворених висновків в аналізі. Історичні дані часто не охоплюють весь спектр об'єктів дослідження або мають систематичні спотворення, пов'язані з умовами збору. Наприклад, у медичних дослідженнях це може бути пов'язано з відсутністю інформації про пацієнтів, які не зверталися за медичною допомогою. У соціологічних чи економічних дослідженнях це є наслідком недоступності даних з певних регіонів чи груп населення. Для правильної інтерпретації результатів необхідно застосовувати методи корекції зміщення, зокрема статистичне зважування або причинно-наслідковий аналіз. Ще однією проблемою є відсутність метаданих, тобто інформації про умови збору, оновлення або контекст використання даних. Без цієї інформації ризик неправильної аналітики

або побудови неправильних моделей значно зростає. Тому важливо забезпечити детальне документування всіх джерел та змін у даних на всіх етапах.

Незважаючи на труднощі, ретроспективні дані є цінним ресурсом для прийняття стратегічних рішень, прогнозування та аналізу тенденцій. Вони дозволяють відстежувати динаміку процесів, виявляти закономірності та формувати гіпотези для подальших досліджень. Для ефективного використання таких даних потрібна компетентна команда з навичками в галузі науки про дані, аналітики, інженерії даних та предметної області. Інструменти автоматизації процесів ETL також відіграють важливу роль, спрощуючи підготовку даних до аналізу. Під час роботи з ретроспективною інформацією доцільно використовувати сучасні платформи для обробки великих даних, зокрема Apache Spark, Snowflake або Google BigQuery. Окрім технічних рішень, особливу увагу слід приділяти етичним та правовим аспектам використання даних, особливо у сферах охорони здоров'я, фінансів та освіти. Загалом, успішна робота з ретроспективними даними вимагає системного підходу, продуманої архітектури та постійного контролю якості даних. Тільки за цих умов можна отримати надійні та корисні аналітичні результати.

Література

1. Alkhatib, R., & Gaede, K. I. (2024). Data Management in Biobanking: Strategies, Challenges, and Future Directions. *BioTech*, 13(3), 34. <https://doi.org/10.3390/biotech13030034>.
2. Robinson, M.D. (2023). Retrospective Reports. In: Maggino, F. (eds) *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17299-1_2515.

СЕКЦІЯ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ
СЕКЦІЯ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ КОМБІНАТОРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ.

CONSTRAINT PROGRAMMING WITH CONJURE INSIDE JUPYTER NOTEBOOKS
Özgür Akgün
School of Computer Science, University of St Andrews, UK
ПРОГРАМУВАННЯ З ОБМЕЖЕННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ CONJURE INSIDE JUPYTER NOTEBOOKS

Далі наводиться презентація доповіді.

Constraint Programming

Dr Özgür Akgün
School of Computer Science, University of St Andrews

4 June 2025

My plan for this talk • Constraint Programming • Present our Jupyter notebook integration through an • Magic Hexagons • Give pointers to CSPLib and Conjure • I can't fit a lot in a single talk • Treat this talk as an advert, check the resources, get i	OR vs CP • Operations research • OR = LP, MIP, ILP • The two disciplines are closely related • In fact many related areas exist: • Boolean Satisfiability (SAT) • SAT Modulo Theories (SMT) • Answer Set Programming (ASP) • Metaheuristics • Generally: decision making and optimisation systems
--	--

CP: high-level modelling

- Modelling in OR is tough
- Language is very restricted: system of inequalities
- If your problem happens to fit into this shape, life is good
- Historically CP allowed more kinds of constraints
- Recent research makes high-level modelling easier
- Added benefit: we can automatically convert a high-level model to OR/SAT/SMT/etc solvers (as well as CP)

Significance of modelling • Modelling decisions • Multiple ways to model a single problem • Huge impact on solving performance • “Modelling is an art, rather than science.” • Can we make it science?	Constraint Programming (CP) • Paradigm for solving combinatorial problems • Satisfaction • Optimisation • CP = Modelling + Solving • Modelling = Capture problem in a formal declarative • Solving = (Mostly) black-box • Holy Grail of CS: <i>User states the problem, computer solves it</i>
---	--

Example: Subset Sum

- Given a set of integers, find a subset whose sum is 0

language Essence 1.3

given nums : set of int

find x : set of int

such that $x \text{ subsetEq } \text{nums}, (\sum i \text{ in } x . i) = 0$

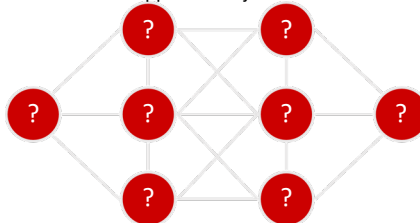
- Input: $\{-7, -3, -2, 5, 8\}$ Output: $\{-3, -2, 5\}$

Some advertisement

- Get Conjure
 - github.com/conjure-cp/conjure
 - conjure.readthedocs.io
- Essence Catalog github.com/conjure-cp/EssenceCatalog
- CSPLib CSPLib.org

Let me start with a fun puzzle

- Place letters A to H on nodes such that:
 - Each letter appears exactly once.
 - Consecutive letters do not appear on adjacent nodes.

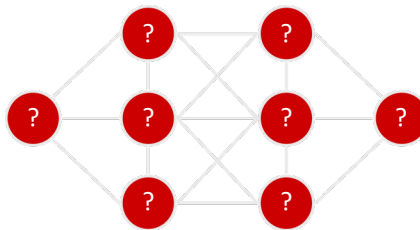


Crystal Maze

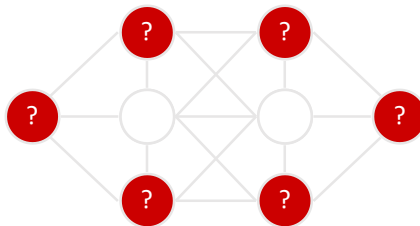
- UK TV show
- Contestants solve puzzles to progress in the game



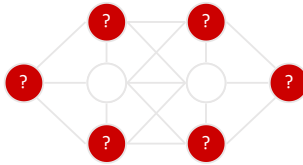
Which nodes are hardest to label?



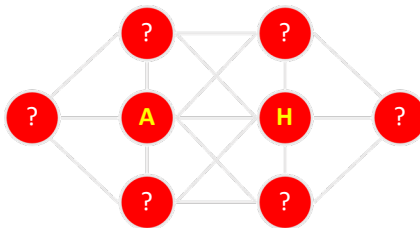
Which nodes are hardest to label?



Which are the least constraining letters to use?

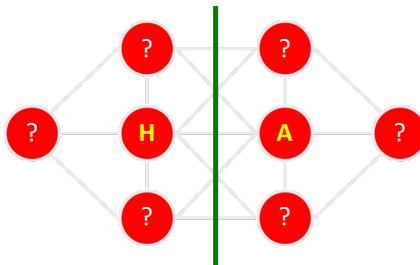


Which are the least constraining values to use?

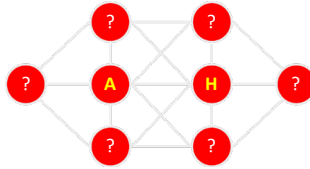


Symmetry

- We do not need to consider:

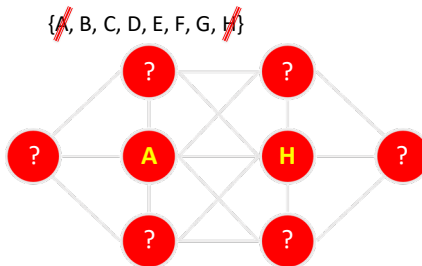


Some Deduction

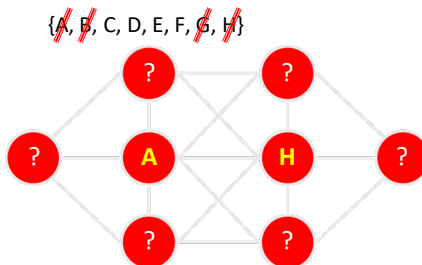


- Eliminate possibilities for other nodes now that we have placed A, H.

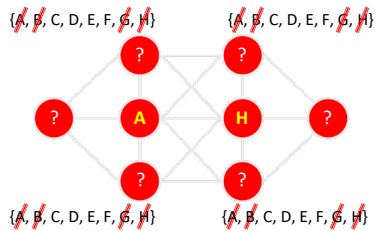
Deduction: A – H Appear Exactly Once



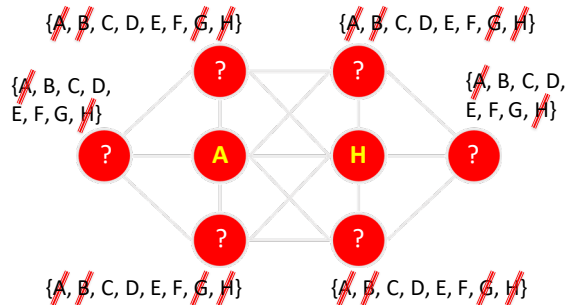
Deduction: Adjacency



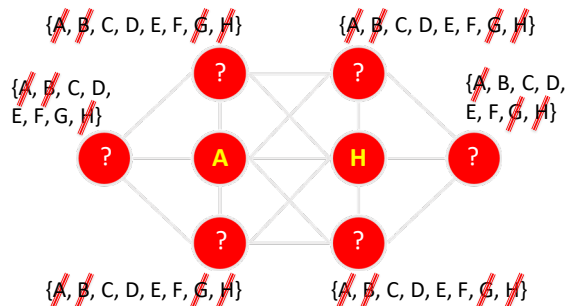
Similarly



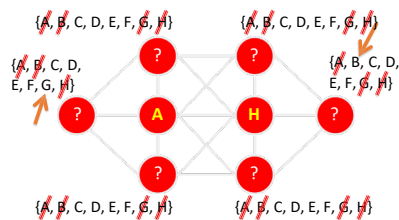
Deduction: A – H Appear Exactly Once



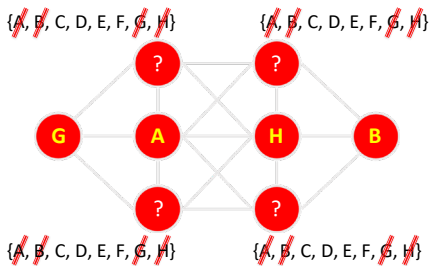
Deduction: Adjacency



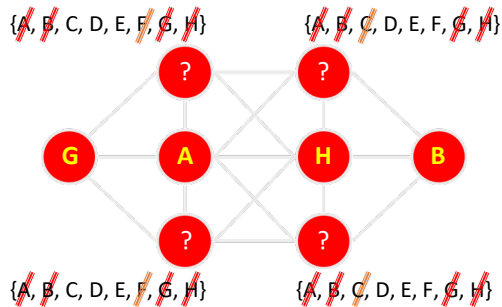
Deduction: A – H Appear Exactly Once



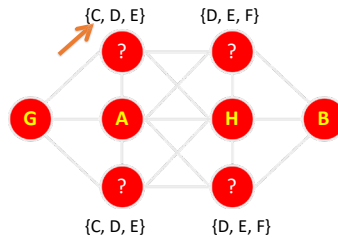
Deduction: A – H Appear Exactly Once



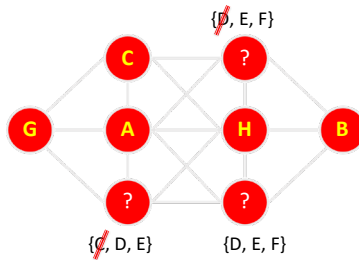
Deduction: Adjacency



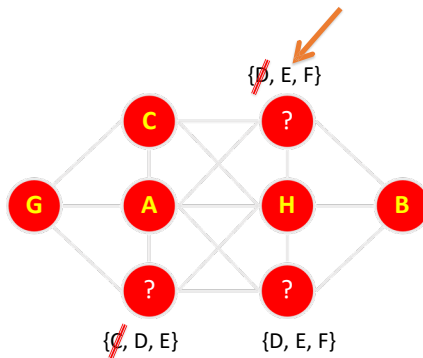
Guess (But Be Prepared to Backtrack)



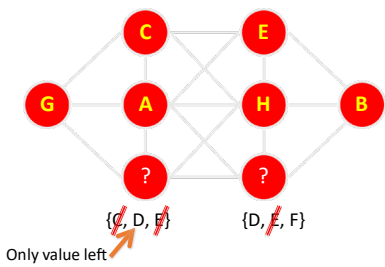
Deduction: A – H Appear Exactly Once, Adjacency



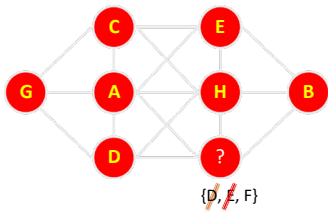
Guess (But Be Prepared to Backtrack)



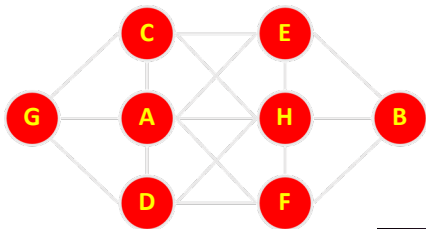
Deduction: A – H Appear Exactly Once



Deduction: A – H Appear Exactly Once



Solution



Some advertisement

- Get Conjure
 - github.com/conjure-cp/conjure
 - conjure.readthedocs.io
- Essence Catalog github.com/conjure-cp/EssenceCatalog
- CSPLib CSPLib.org

НЕЧІТКА СППР ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЕМ ПРОЕКТІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ЕНЕРГОЄМНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Величко А.Д., Дубровін В. І.

Національний університет “Запорізька Політехніка”

FUZZY DSS FOR ENERGY SAVING PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENT AT ENERGY-INTENSIVE ENTERPRISES

A.D. Velychko, V.I. Dubrovin

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract: Fuzzy-based decision support systems are proposed to enhance energy portfolio management at energy-intensive enterprises. This work introduces a hybrid optimization framework combining the Energy Semantic Mapping Model (ESMM), deep learning (ResNet), and a genetic algorithm to process unstructured data and improve decision-making under uncertainty.

Keywords: fuzzy decision support; energy portfolio; unstructured data; semantic model; ResNet; genetic algorithm; optimization; energy efficiency

Вступ. В умовах стрімкого зростання енергоспоживання та посилення екологічних проблем ефективне управління енергетичними системами стає критично важливим. Традиційні методи стикаються з проблемами низької ефективності, нерационального розподілу ресурсів та забруднення навколишнього середовища [1].

Сучасні рішення спираються на інтеграцію інформаційних технологій та систем підтримки прийняття рішень, особливо під час роботи з великими обсягами як структурованих, так і неструктурованих даних (наприклад, прогнозів, документів, відгуків). Однак складність обробки таких даних та необхідність надійних моделей за високої невизначеності залишаються серйозними викликами [2].

У відповідь на це дослідження пропонує нову структуру, що поєднує технології обробки неструктурованих даних та нечітку підтримку прийняття рішень. Мета – підвищити точність, стійкість та адаптивність управління енергосистемами, а також забезпечити безпеку та конфіденційність даних. Це дозволяє більш ефективно вирішувати завдання сталого розвитку та інтелектуальної трансформації енергетики.

Застосування нечітких систем підтримки ухвалення рішень в енергетиці

Нечітка система підтримки прийняття рішень є потужним інструментом для роботи з невизначеністю та широко використовується в енергетичних системах, особливо в задачах прогнозування та управління попитом. В основі лежить теорія нечітких множин, що дозволяє моделювати нечіткі явища, характерні для реального світу.

У цьому дослідженні запропонована вдосконалена структура, що поєднує СППР та методи обробки неструктурованих даних. Це дозволяє враховувати такі фактори, як погодні умови та ринкові коливання, покращуючи точність прогнозування та оптимізацію розподілу ресурсів.

Для обробки текстових та візуальних даних використовуються передові технології: модель семантичного картування енергії (ESMM) та архітектура ResNet. ESMM отримує важливу інформацію з текстів, а ResNet аналізує зображення для моніторингу стану обладнання. Інтеграція цих підходів забезпечує більш гнучке, точне та стійке керування енергосистемою в умовах невизначеності.

Нечітка система підтримки прийняття рішень

Стратегія проектування і оптимізації нечіткої системи підтримки прийняття рішень є ядром даного дослідження. Крім того, генетичні алгоритми використовуються для оптимізації нечітких правил і вибору оптимальної комбінації правил за допомогою операцій кросингвера і мутації, тим самим покращуючи загальну продуктивність моделі. Застосування генетичного алгоритму може оптимізувати конфігурацію параметрів нечіткої системи крок за кроком, покращити всю продуктивність нечіткої системи та реалізувати інтелектуальне керування енергетичною системою.

Процес нечіткого виведення зазвичай включає три етапи: фазифікація, висновок та дефазифікація. На основі класичної моделі Мамдані можуть бути введені більш просунуті методи міркування, такі як нечітка логіка типу 2 або інтуїціоністська нечітка логіка для роботи з вищими рівнями невизначеності, структура яких показана на рис.

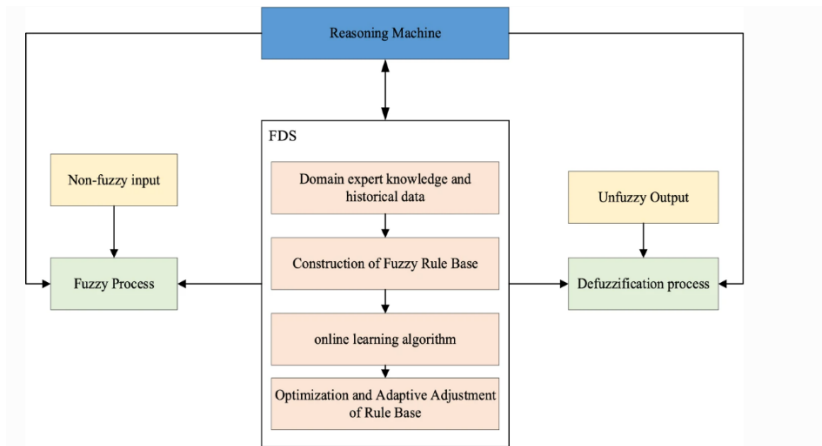


Рисунок. Структура нечіткої системи прийняття рішень

Інтеграція неструктурованих даних та нечітких систем підтримки рішень

У цьому розділі ми детально обговоримо, як інтегрувати результати обробки неструктурованих даних у нечіткі системи підтримки рішень та як використовувати цю інформацію в оптимізації моделі.

(1) ESMM [3,4] обробляє текстову інформацію: за допомогою ESMM кожне ключове слово або фраза відображається у багатовимірний вектор, який можна вважати частиною вхідних даних моделі. Припустимо, що після обробки ESMM вектор, що відповідає ключовому слову «енергетична політика», є e , що відображає семантичну силу слова в певному контексті. Ці вектори об'єднуються для формування вектора текстових ознак, який можна використовувати як вхідні дані або обмеження для моделі.

(2) ResNet обробляє інформацію про зображення: вектори ознак, що видаються ResNet, представляють стан об'єктів на зображенні, наприклад, чи пошкоджено пристрій. Ці характеристики можна використовувати безпосередньо для оцінки витрат на технічне обслуговування або доступності обладнання. Припустимо, що кількісна

оцінка стану справності пристрою дорівнює , де H – це функція оцінки справності на основі обчислень.

Розробка нечітких правил базується на теорії нечітких множин для роботи з невизначеністю в прогнозуванні. Загальна форма нечіткого правила - "якщо (частина умови) то (частина висновку)", частина умови зазвичай складається з кількох нечітких множин, а частина висновку дає нечіткий опис змінної.

Висновок У суспільстві енергетичні системи зіштовхуються зі зростаючою складністю і невизначеністю, включаючи збільшені коливання попиту енергії, жорсткіші екологічні обмеження і зростаючі експлуатаційні витрати. Традиційні методи управління важко справляються з цими складними ситуаціями ефективно. Тому дуже важливо вивчити метод оптимізації енергетичної системи на основі нечіткої системи підтримки прийняття рішень. Подібні моделі можуть стати стандартом у промисловості в найближчі 5–10 років.

Особливістю цієї моделі є її здатність самостійно адаптуватись до змін у зовнішньому середовищі, оперативно аналізувати нові типи даних та забезпечувати точні, надійні рішення для управління портфелем енергозберігаючих заходів. У тестуванні модель перевершила традиційні підходи щодо точності прогнозів та швидкості реагування. Практичне застосування на підприємствах дало змогу зменшити споживання енергії, оптимізувати витрати і краще розподіляти ресурси між проектами. Оцінка на навколишнє середовище підтверджує зниження вуглецевих викидів при використанні запропонованої моделі.

Економічний аналіз демонструє значне скорочення витрат на придбання енергії, експлуатацію та техобслуговування – загальна економія перевищує 25%. Також відзначено підвищення задоволеності користувачів та скорочення часу відгуку систем, що свідчить про практичну ефективність запропонованого рішення. На завершення хочу відзначити, що впровадження таких інтелектуальних СППР є одним із ключових кроків до цифровізації промисловості та сталого розвитку.

Література

1. Дубровін В.І. Прийняття рішень у процесі управління ризиками проектів : навчальний посібник / В.І. Дубровін, В.М. Льовкін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – 196 с. (Гриф надано МОНмолодьспорту України, лист №1/11-4876 від 15.06.2011 р.)

2. Дубровін В.І. Юськів О.І. Керування процесами енергозбереження на металургійних підприємствах. [Текст] / «Вісник

Херсонського національного технічного університету» ВІСНИК ХНТУ №2(69) – частина 2, 2019 - С 61-68.

3. Energy system optimization based on fuzzy decision support system and unstructured data Zhe Zhang Energy Informatics volume 7, Article number: 82 (2024)
https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00396-2?utm_source=

4. Çoban V (2020) Solar energy plant project selection with AHP decision-making method based on hesitant fuzzy linguistic evaluation. Complex Intell Syst 6(3):507–529
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-020-00152-5>

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ШЛЯХІВ ВХІДНИХ ДАНИХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ОПЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС

Борис Вінтенко, Олексій Смірнов, Ірина Миронець,
Тетяна Смірнова, Сергій Смірно

*Черкаський державний технологічний університет, Черкаси,
Україна*

*ПАТ “Науково-виробниче підприємство “Радій”, м.
Кропивницький, Україна*

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.
Кропивницький, Україна*

SIMULATION MODEL OF INPUT DATA PATHS OF A COMPUTER INTELLIGENT SUPPORT SYSTEM FOR A NPP POWER UNIT OPERATOR

Borys Vintenko, Oleksii Smirnov, Iryna Myronets Tetiana Smirnova,
Serhii Smirno

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
PJSC “Scientific and Production Enterprise “Radius”, Kropyvnytskyi,
Ukraine*

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi,
Ukraine*

Abstract. This theses investigates methods for increasing the fault tolerance of a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The purpose of this study is to increase the fault tolerance of

intelligent support systems for the operator when receiving information about the state of technological parameters important for the power plant control procedures. The object of the study is the ways of receiving input data by a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The subject of the study is a model of the ways of receiving input information to a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The problem of ensuring the reliability of input information and methods for solving it, which are based on the redundancy and multi-version of the components used, is considered. A simulation model of the input data paths of a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator has been developed, which differs from the known ones by taking into account the indicators of multi-version of components.

Постановка проблеми. Енергоблок АЕС є складним технологічним об'єктом, керування яким здійснюється оперативним персоналом (ОП) на блочному щиті керування (БЩК). Під час роботи ОП використовує інформацію, яка надається йому за допомогою індикаторів та приладів панелей керування, а також за допомогою цифрових інформаційних систем. Прийняття рішень ОП здійснюється на основі технологічних регламентів.

Для підвищення ефективності та надійності роботи ОП, актуальною науково-практичною задачею є створення комп'ютеризованих інтелектуальних систем підтримки оператора (СПО).

Інформація про значення технологічних параметрів отримується з датчиків, що встановлені на обладнанні енергоблоку. Дані з цих датчиків електричними каналами передаються до програмно-технічних комплексів (ПТК) енергоблоку. Інформація про параметри у вигляді значень аналогових та дискретних значень реєструється на серверах ПТК та за допомогою комп'ютерних мереж передається до інших систем енергоблоку, зокрема і до СПО.

Актуальність даних про стан технологічних параметрів є необхідною умовою для функціонування СПО. Тому важливою задачею при створенні СПО є підвищення відмовостійкості СПО в частині отримання цих даних.

Систему підтримки оператора можна розглядати як набір об'єктів, одним з яких є підсистема отримання вхідних даних. Стійкість систем до відмов, тобто здатність виконувати основні функції при виникненні відмов окремих компонентів, може реалізовуватися різними способами.

Так, популярним методом підвищення відмовостійкості є резервування обладнання, програмного забезпечення та інформації. Також для підвищення стійкості до відмов програмного забезпечення та

інформації є застосування самоконтролю та блоків відновлення. При використанні даної технології результати обчислень перед передачею в іншу підсистему перевіряються на коректність, і у випадку непроходження перевірки ті ж самі обчислення виконуються повторно, іншими способами, до досягнення потрібного результату.

В галузях, що вимагають високої надійності та стійкості до відмов, останніми десятиліттями набуває популярності використання багатоверсійних технологій. Так, для підвищення відмовостійкості апаратного забезпечення використовуються різні типи мікросхем (мікропроцесори та FPGA), для підвищення відмовостійкості програмного забезпечення використовується N-версійне програмування. Відмови з загальної причини є проблемою для резервованих систем [8]. У випадку виникнення загальної причини можуть відмовити одразу декілька компонентів. Такою причиною може бути як апаратна (наприклад, зникнення електричного живлення основного та резервованого сервера), так і недолік у проєктуванні (розміщення резервованих ліній зв'язку в одній кабельній шахті та вихід з ладу обох при пожежі), а також дефект програмного забезпечення, що використовується у резервованих каналах.

Для зменшення імовірності відмови з загальної причини використовується багатоверсійне програмне забезпечення. Багатоверсійність може бути застосована для даних, програмного коду, та функціональності. Після виконання функції різними версіями програмного забезпечення відбувається аналіз отриманих результатів, порівняння їх між собою та фільтрування результатів, що не відповідають вимогам. Також використовуються різні схеми голосування. Найпоширенішими схемами є «1/2», «2/3», «2/4» або «3/4». Вибір схеми залежить від вимог до безпеки, надійності, допустимого рівня хибних спрацювань та неспрацювань.

Таким чином, підвищення відмовостійкості підсистеми отримання вхідних даних СПО доцільно проводити на основі аналізу відмовостійкості джерел отримання цих даних та шляхів їх передачі.

Постановка завдання. У даному дослідженні необхідно створити модель шляхів вхідних даних системи підтримки оператора, в якій буде міститися інформація про використані технології та їх версійні відмінності.

Виклад основного матеріалу. Методи забезпечення відмовостійкості СПО. Джерела вхідних даних для СПО. Основною функцією підсистеми отримання вхідних даних СПО є прийом значень технологічних параметрів від зовнішнього оточення. Точками взаємодії

підсистеми з зовнішнім оточенням є вхідні сигнали. Вхідні сигнали можуть бути розділені на первинні та вторинні.

Значення первинних вхідних сигналів отримуються шляхом вимірювань. Прикладами таких значень є тиск, температура, тощо. Також, до первинних вхідних сигналів можна віднести інформацію, яка отримана від оператора: введені через інтерфейс користувача значення, натиснуті оператором кнопки, сформовані команди за допомогою ключів керування тощо.

Вторинними сигналами можна вважати сигнали, значення яких отримані в результаті обробки даних первинних сигналів: швидкість, температура насичення, спрацювання уставок, тощо.

У найпростішому випадку, вхідна інформація СПО може бути представлена у вигляді множини технологічних параметрів P :

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\} \quad (1)$$

де P_i – окремий вхідний параметр, n – загальна кількість параметрів. Проте таку модель не можна використовувати безпосередньо. На практиці, між параметром та алгоритмом СПО існує система вимірювання з проміжних апаратних та програмних елементів, які забезпечують прийняття, первинну обробку, перетворення, передачу інформації. Це обумовлено такими причинами: необхідність фільтрації та обробки даних у випадку наявності шумів, перешкод або нестабільності; наявність параметрів, що формуються на основі сигналів з декількох датчиків або обчислень; конверсія сигналів з одного типу в інший, стандартний та придатний для обробки; фізична віддаленість елементів не дозволяє підключити датчики безпосередньо до системи; наявність фізичних бар'єрів захисту; необхідність захисту даних від зовнішніх атак: додаткові елементи (брандмауери, системи контролю доступу, дата-діоди), що забезпечують інформаційну безпеку; необхідність протоколювання та моніторингу; координація та інтеграція великої кількості ПТК, реалізація різних протоколів зв'язку за допомогою шлюзів, тощо.

Елементи шляхів. Враховуючи наявність системи вимірювання та обробки, для кожного параметру можна визначити шляхи передачі, що складаються з множини елементів. Для представлення шляху $Path$ використаємо векторну модель:

$$Path = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_i\} \quad (2)$$

де E_{ni} – елемент, через який проходять дані сигналу. Кожний елемент у векторі $Path$ може мати набір атрибутів: тип, продуктивність, надійність, протокол обміну, час затримки, тощо. Приклад набору елементів шляху вхідних даних для параметру: E_1 – датчик; E_2 – перетворювач форми сигналу (аналоговий-цифровий); E_3 – фільтр;

E_4 – кабельний канал; E_5 – комутатор; E_6 – модуль контролю безпеки; E_7 – мережева карта; E_8 – сервер; E_9 – програмне забезпечення сервера.

Така модель отримання вхідних даних СПО, з точки зору теорії надійності, є найменш стійкою до відмов, оскільки передбачає послідовне з'єднання елементів.

Резервування шляхів передачі вхідних сигналів. Одним з поширених способів підвищення відмовостійкості систем вимірювання та передачі критичних параметрів є резервування. Зазвичай для вимірювання значення одного технологічного параметру застосовуються декілька датчиків, які мають незалежну схему живлення, конструкцію та канали передачі інформації (багатоверсійний підхід). При відмові елементів одного каналу отримання даних інформація про параметр залишається актуальною через інші датчики та канали зв'язку.

На АЕС можуть бути використані наступні види резервування: резервування датчиків; резервування ліній зв'язку; резервування програмного забезпечення; резервування комунікаційних пристроїв; резервування серверів тощо.

Таким чином, для отримання значення одного параметра може використовуватися матриця шляхів

$$\begin{Bmatrix} Path_1 \\ Path_2 \\ Path_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{1m} \\ E_{21} & E_{22} & E_{2m} \\ E_{n1} & E_{n2} & E_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де E_{ij} – елементи шляхів.

При резервуванні отримується паралельна робота шляхів вимірювання (або їх частин), що підвищує відмовостійкість системи.

Слід зазначити, що створення окремих шляхів отримання вхідної інформації для кожного ПТК є складною та не завжди можливою задачею. Зазвичай інформація про критично важливі параметри отримується з резервованих датчиків, розмножується та передається у різні ПТК. В свою чергу, підсистема отримання вхідних даних СПО може отримати значення одного і того самого параметру від різних ПТК. Наприклад, інформація про температуру теплоносія в реакторі реєструється в системах захисту (АЗ), системах безпеки (СБ), системах нормальної експлуатації (СНЕ). Кожна точка реєстрації параметру в ПТК є окремим сигналом з унікальним ідентифікатором. Таким чином, СПО може отримати інформацію про значення технологічного

параметру з різних сигналів, що надходять різними шляхами, з залученням різних елементів.

Багатоверсійність елементів шляхів. Кожний елемент вносить певну інтенсивність відмов у систему. Всі відмови можуть бути розподілені на дві категорії: відмови з фізичних причин та відмови через недоліки у проектуванні.

Для оцінки інтенсивності відмов через фізичні дефекти використовуються довідкові дані виробників. Інтенсивність відмов через дефекти проектування може бути оцінена статистичним шляхом.

Метод кількісної оцінки зменшення інтенсивності відмов при використанні двоверсійної (диверсної) системи описаний у [10].

У відповідності до даного методу, множина всіх відмов N у двоверсійній системі визначається як

$$N = N_1 \cup N_2 \cup N_{12}, \quad (4)$$

де N_1 – множина відмов тільки першої версії системи, N_2 – множина відмов тільки другої версії системи, N_{12} – множина одночасних відмов першої та другої версії системи.

Інтенсивність відмов двоверсійної системи визначає потужність множини N_{12} . Очевидно, що ця множина зменшується зі зростанням відмінностей у проектуванні двоверсійної системи.

Кількісне співвідношення інтенсивності відмов двоверсійної системи та одноверсійної системи визначається коефіцієнтом диверсності:

$$K_D = \frac{|N_{12}|}{|N^{1B}|} \quad (5)$$

де $|N_{12}|$ – потужність множини відмов двоверсійної системи, а $|N^{1B}|$ – потужність множини відмов одноверсійної системи.

В результаті застосування диверсності, інтенсивність відмов двоверсійної системи λ_{12} , що викликані загальними дефектами проектування обох версій становить:

$$\lambda_{12} = K_D \cdot \lambda^{1B} \quad (6)$$

де λ_{12} – інтенсивність відмов одноверсійної системи, K_D – коефіцієнт диверсності.

Для кількісної оцінки глибини різниці між версіями елементів системи використовуються метрики диверсності. Значення 0 метрики відповідає відсутності різниці між версіями (одноверсійна система), 4 – максимальній різниці. Коефіцієнт диверсності K_D системи обернено

пропорційний до інтегрального показника диверсності системи: при відсутності диверсності ($D = 0$) коефіцієнт K_D буде рівний одиниці, що згідно (6), не знизить інтенсивність відмов з загальної причини.

Розробка моделі шляхів отримання вхідних даних СПО. Відмінність елементів шляхів вхідних даних. Для забезпечення відмовостійкої роботи СПО має використовувати резервовані дані у вигляді сигналів. Як було показано, ці дані можуть надходити різними шляхами через різні послідовності елементів. Відповідно, задачею розробника СПО є вибір сигналів та шляхів їх прийому з урахуванням обраної схеми голосування.

У шляхах передачі інформації, які можуть забезпечувати СПО вхідними даними, можуть застосовуватися різні типи елементів. До кожного з виду елементів може бути застосована шкала відмінностей між їх версіями.

Таким чином, для аналізу відмовостійкості шляхів вхідних даних СПО необхідно сформувати наступні дані: для кожного типу елемента на основі статистичних даних має бути визначена базова кількість відмов, що сформує показник $N^{1/e}$; на основі відмінностей для кожного набору шляхів вхідних даних має бути сформований набір показників глибини диверсності, які сформують загальний показник диверсності D .

Розробка моделі шляхів вхідних даних. До складу кожного ПТК входять модулі прийому інформації, логічні модулі, сервери та програмне забезпечення. Кожний ПТК цифровим каналом передає необхідну інформацію до суміжних систем. Інформацію про один і той самий технологічний параметр СПО може запитувати у різних серверів різних ПТК.

Узагальнена архітектура отримання даних може бути представлена у вигляді мережі. На даній схемі використовуються такі вузли: датчики (S), перетворювачі (C), кабелі, модулі вхідних сигналів (In), логічні модулі та модулі передачі інформації (Lm), комутатори (Comm), сервери (Srv), комп'ютери (Pc) з мережевими картами та програмним забезпеченням.

Дана мережа може бути представлена у вигляді графу $G = (E, L)$, вершини E якого – елементи каналів зв'язку, а ребра L – канали передачі інформації.

Основні властивості даного графу будуть наступними: граф є деревом; граф має одну початкову точку, яка визначає собою вимірюваний технологічний параметр; граф має одну кінцеву точку, яка є входом до системи, вхідні дані якої аналізуються; граф є орієнтованим, оскільки сигнали від джерел до системи передаються в одному напрямку; від початку вимірювання до точки прийому інформації є як

мінімум один шлях; для первинних параметрів шлях сигналу починається з пристрою, який реєструє сигнал (датчика); для вторинних параметрів шлях сигналу починається з логічного модуля ПТК, який обчислює значення даного параметру. Наприклад, якщо вхідними даними є значення температури насичення, то до складу шляху включаються також датчики температури та тиску, а також компоненти, які виконують обчислення даного сигналу.

Кожна вершина графу $e \in E$ описується набором наступних властивостей:

$$e = \{Type, \{Tech\}, \{Versions\}, Tag\}. \quad (7)$$

Ці властивості мають наступні значення: **тип елементу** *Type* – код типу елементу, що є складовим шляху передачі. На шляху передачі використовуються різні типи елементів, такі як датчики, кабелі, комутатори, сервери, програмне забезпечення. Кожний тип характеризується власним набором параметрів, за яким його можна порівнювати з іншими елементами. В таких задачах, як визначення відмовостійкості шляху, порівняння доцільно виконувати між компонентами, які мають один тип; **коди технологій** $\{Tech\}$ – номери технологій, що використовуються у даному елементі. Використовуються для визначення можливості відмови з загальної причини для обраних елементів; **версії технологій** $\{Versions\}$ – версії технологій, що використовуються у даному елементі. Використовуються для визначення глибини версійної відмінності між шляхами; **тег** *Tag* – означає додаткову інформацію, зокрема початок та кінець шляху (“param” та “source”).

Крім графу мережі, до складу моделі входить інформація про технології, що використовуються в елементах. Кожна технологія $tech \in Tech$ описується часом напрацювання на відмову, переліком версій та версійною відмінністю (глибиною диверсності):

$$tech = \{MTTF, \{Version, D\}\}. \quad (8)$$

Ці властивості мають наступні значення: час напрацювання на відмову *MTTF* – прогнозований час напрацювання на відмову, що є наслідком застосування даної технології. Ця величина визначається за статистичною інформацією або за документацією виробника елементу. З цього показника отримується інтенсивність відмов елементу λ :

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}, \quad (9)$$

– **масив пар значень версії та диверсності** $\{Version, D\}$ характеризує наявні версії даної технології та їх версійні відмінності. В цьому масиві присутня мінімум одна базова версія 0 з показником диверсності $D = 0$, для якої визначений базовий час напрацювання на відмову. Для інших версій значення D представлене цілими значеннями від 1 до 4, яке характеризує версійну відмінність у порівнянні з базовою.

В якості версійної відмінності між парою версій технології застосовується максимальне значення показника D для заданої пари версій:

$$D(v1, v2) = \max(D(v1), D(v2)). \quad (10)$$

В залежності від виду елемента, число D формується у відповідності до методології, описаної вище.

Приклади відомостей про технології та їх базовий час напрацювання на відмову приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Приклади відомостей про технології та їх базовий час напрацювання на відмову

Найменування технології	Код	Час напрацювання на відмову
Мова програмування	1	1020
...	...	...
Мережевий протокол	3	920
...	N	

Приклад версійної відмінності між різними версіями технології (мова програмування високого рівня) приведений в таблиці 2.

Таблиця 2

Приклад версійної відмінності між різними версіями технології (мова програмування високого рівня)

Version	0 (C++11)	1 (C++14)	2 (C++20)	C#	Python
D	0	1	1	2	4

Версійна віддаленість може бути представлена у вигляді геометричної форми. Якщо позначити кожен окрему версію точками, то

відстань між точками є пропорційною до версійної віддаленості відповідно до (4).

Наприклад, для трьох версій, одна з яких базова ($D = 0$), друга – відрізняється незначно ($D = 1$), а третя – радикально ($D = 4$), геометрична форма відображається як трикутник.

Висновки. У даному дослідженні було показано, що при забезпеченні відмовостійкості системи підтримки оператора АЕС необхідно використовувати такі підходи як резервування, голосування та багатOVERсійність.

Було показано, що вхідні дані до системи підтримки можуть надходити різними шляхами, що складаються з множини елементів.

Була створена модель вхідних шляхів у вигляді графу, вершини якого визначають елементи шляхів, а ребра – напрямки передачі інформації. Дана модель включає в себе інформацію про базову інтенсивність відмов технологій елементів та їх версійну відмінність.

У подальших дослідженнях буде розглянутий аналіз відмовостійкості шляхів вхідних даних та розроблений метод вибору комбінації шляхів для максимізації відмовостійкості та мінімізації відмов в загальній причини в системі підтримки оператора АЕС.

MODEL OF CHANGE OF WORKING STATES OF THE OBJECT OF INFORMATION INTERACTION OF INFORMATION SUPPORT OF CIVIL AVIATION

Kalashnyk G.A., Kalashnyk-Rybalko M.A.
Ukrainian State Flight Academy

Abstract. *The authors have presented the model of change of working states of the object of information interaction in the sphere of satellite navigation and information support for civil aviation of Ukraine. It takes into account the features of interaction in a networked information environment distributed in geographical space. The principles of ensuring information interaction in the field of satellite navigation and information support under any heliogeophysical operating conditions are presented.*

Satellite navigation systems are subject to the disturbing influence of space weather factors due to sudden changes in the intensity and composition of solar radiation. The latter bring the layers of the Earth's atmosphere into an unstable state, but their density remains unchanged [1]. The above

circumstances disrupt the trajectories of satellites. There are known cases of spacecraft death for these reasons in dense layers of the atmosphere. The electrically active plasma component of the atmosphere, interacting with the satellite shell, causes their electrification and complicates or disrupts their functioning [2]. Navigation may be indirectly affected by disruptions under the influence of space weather factors of radio communication systems, main cable lines, power supply, as well as incorrect or insufficient consideration of the role of these factors when solving engineering problems.

The tasks, the solution of which provides systemic support for effective satellite navigation and information support under any heliogeophysical operating conditions, include the development of a mathematical model of changes in the operational states of the object of information interaction and the improvement of the method of information interaction in the field of satellite navigation and information support under any heliogeophysical operating conditions.

The mathematical model of changes in the operational states of the object of information interaction is characterized by the processes of natural and artificial degradation, as well as the restoration of its operational capacity, and can be displayed as a set of rectangular matrices of mutual influences of material and non-material resources of one of the parties to the interaction in a competitive situation:

$$\Lambda(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\lambda_{12}(t) & -\lambda_{13}(t) & -\lambda_{14}(t) & -\lambda_{15}(t) \\ \lambda_{12}(t) & 0 & -\lambda_{23}(t) & -\lambda_{24}(t) & -\lambda_{25}(t) \\ \lambda_{13}(t) & \lambda_{23} & 0 & -\lambda_{34}(t) & -\lambda_{35}(t) \\ \lambda_{14}(t) & \lambda_{24}(t) & \lambda_{34}(t) & 0 & -\lambda_{45}(t) \\ \lambda_{15}(t) & \lambda_{25}(t) & \lambda_{35}(t) & \lambda_{45}(t) & 0 \end{pmatrix},$$

where $\Lambda(t)$ is integrated indicator of natural degradation of the socio-technical system;

$\lambda_i(t)$ is indicator of natural degradation of elements of the socio-technical system (STS); i are element numbers.

$$\mu(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\mu_{12}(t) & -\mu_{13}(t) & -\mu_{14}(t) & -\mu_{15}(t) \\ \mu_{12}(t) & 0 & -\mu_{23}(t) & -\mu_{24}(t) & -\mu_{25}(t) \\ \mu_{13}(t) & \mu_{23} & 0 & -\mu_{34}(t) & -\mu_{35}(t) \\ \mu_{14}(t) & \mu_{24}(t) & \mu_{34}(t) & 0 & -\mu_{45}(t) \\ \mu_{15}(t) & \mu_{25}(t) & \mu_{35}(t) & \mu_{45}(t) & 0 \end{pmatrix},$$

where $\mu(t)$ is integrated indicator of artificial degradation of the socio-technical system; $\mu_i(t)$ is an indicator of artificial degradation of individual elements of the socio-technical system.

$$B(t) = \begin{pmatrix} 0 & \beta_{21}(t) & \beta_{31}(t) & \beta_{41}(t) & 0 \\ 0 & -\beta_{21}(t) & \beta_{32}(t) & \beta_{42}(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{31}(t) - \beta_{32}(t) & \beta_{43}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{41}(t) - \beta_{42}(t) - \beta_{43}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

where $B(t)$ is integrated indicator of the restoration of the socio-technical system; $\beta_i(t)$ is indicator of the restoration of the components of the socio-technical system.

The integrated indicator of mutual influence can be either with a “+” sign, which characterizes the positive resulting influence of inter-resource interactions in the socio-technical system, or with a “-” sign in the opposite case.

The state of the socio-technical system’s overall performance (integrated characteristic) is described by the expression:

$$M(t) = \begin{pmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ \dots \\ m_5(t) \end{pmatrix},$$

where $M(t)$ is integrated indicator of the performance of the socio-technical system; $m_i(t)$ is an indicator of the performance of the components of the socio-technical system.

In the simulation model of the functioning of a production element [3] in a network information environment distributed in geographical space, the mutual influence of quantitative and qualitative components of resource components is taken into account, which is described by a matrix of network mutual influence coefficients of the form:

$$V = \begin{pmatrix} 1 & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & 1 & \dots & v_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{(m-1)1} & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

where $i, j \in 1$, provided that $i \neq j$, and the accounting of the mutual influence of resource components is carried out in relation to their quantitative and qualitative components V_{ij} .

For the created mathematical data model, which takes into account the peculiarities of interaction in a network information environment distributed in geographical space, the conditions for the performance of a production task are the compliance of the quantitative and qualitative indicators of the manufactured product with the given ones [3].

Condition No.1 is compliance of quantitative indicators with the given ones is given by the expression:

$$R(T_0) \leq R_3(T_0), \quad r(T) = \int_0^T r(t) dt,$$

where T_0 is the time of execution of production tasks; $R(T_0)$ is the integral quantitative indicator of the product produced by the STS $R_3(T_0)$ is the integral given quantitative indicator..

Condition No.2 is the conformity of the quality of the produced socio-technical system product to the given one is the expression:

$$k(t) = 1 - q(t),$$

where $q(t)$ is indicator of decline in the quality of the produced product;

$$\frac{dq(t)}{dt} = W(t) [1 - q(t)/q^*] q(t),$$

q^* is limit value of the product quality indicator $q(t)$;

$W(t)$ is scale factor that determines the rate of decline in the quality of the produced product;

$$W(t) = W_0 Q(t) u_H(t) h(t) P_X^{\gamma_X}(t) P_Y^{\gamma_Y}(t) P_Z^{\gamma_Z}(t) P_G^{\gamma_G}(t) P_T^{\gamma_T}(t) P_I^{\gamma_I}(t) P_\psi^{\gamma_\psi}(t) P_H^{\gamma_H}(t),$$

where $h(t)$ is coefficient of increase in experience in the production process;

$$\frac{dh(t)}{dt} = \omega(t) [1 - h(t)/h^*] h(t), \quad (0 < h(t) < 1; h^* = 1),$$

$\gamma_X, \gamma_Y, \gamma_Z, \dots$ are elasticity coefficients of changes in the quality of manufactured products; ω_0 is coefficient characterizing the increase in the coherence of the functioning of the components of the socio-technical system in the production process; h^* is limit value of the coefficient $h(t)$.

The improvement of the method of information interaction through information exchange, based on a multi-level strategic analysis of competitive interaction of participants in the market of works (services) in the field of satellite navigation and information support, is determined as follows:

1) the architecture of the operational space of the multilateral multi-level strategic business computer scenario analysis - the model of the interaction support system is formed in the form of a two-level structure consisting of the "cybernetic" and "noosphere areas", between which information exchange is carried out [4].

2) using the presentation of data processing results in the form of rectangular matrices, an analysis and assessment of the quality of planning

for the targeted use of resources of the i -th socio-technical system and the formation of signals coming from the complex analysis and management model in the analysis and selection model of control decisions to parties A, B, C, D, E is carried out with the appropriate indication and display of detailed information on the screens. The use of the matrix of mutual influences allows you to assess the dependence of the change in the state indicators of some resource components on the influence of the change in the state of others when they are affected by various factors of the external and internal environment. This approach ensures the development of rational management decisions during interaction to adjust the state of resource components of the object of information interaction [4].

The "cybernetic" area includes software and information support that provides processes of changing ontological elements, which are cybernetic analogues of real socio-technical systems, as well as the interaction of these ontological elements with each other.

In turn, the "noosphere" area is formed by "organizational" elements - personnel (scientific, engineering, technical, administrative) equipped with appropriate computing facilities, who conduct research - monitoring the information space, conducting simulation experiments, etc. That is, the "noosphere" area is a set of "human - machine" systems.

References

1. Small Spacecraft Technology State of the Art. NASA/TP–2015–216648/REV1. 2015.180 p.

2. Kalashnyk G., Kalashnyk-Rybalko M.A. Research of the optimal geometry of the location of antenna systems of single-frequency receivers of aircraft navigation signals under the influence of space weather. Conference Proceedings, *International Conference "GeoTerrace-2022"*, 3-5 October 2022, Lviv, Ukraine (GeoTerrace'2022). By Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers, Volume 2022 P. 1–5. (SCOPUS) DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590034>

3. Kalashnyk G., Kalashnyk-Rybalko M.A. Architectural features of a promising intelligent space weather data processing system for increasing the efficiency of radio equipment of civil aviation for the conditions of Ukraine. Conference Proceedings, *International Conference "GeoTerrace-2024"*, 7-8 October 2024, Lviv, Ukraine (GeoTerrace'2024). By Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers, V.2024 p.1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510090>.

4. Kalashnyk G.A., Kalashnyk-Rybalko M.A. Methodology for Ensuring the Functional Stability of Aircraft Integrated Modular Avionics

ФРАГМЕНТАРНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОКРИТТЯ

Ігор Козін, Сергій Борю, Олег Сардак
Запорізький національний університет

FRAGMENTED MODELS FOR COVERING PROBLEMS

Ihor Kozin, Serhii Boriu, Oleh Sardak
Zaporizhzhia national university

Abstract. The study examines the concepts of fragmentary structure and fragmentary model of optimization problems. The research demonstrates that constructing a fragmentary model enables the reduction of constrained optimization problems to unconstrained optimization problems on permutation sets, which allows the application of universal metaheuristics for solving these problems. The paper considers fragmentary models for specific types of covering problems.

Задачі покриття утворюють великий клас оптимізаційних задач в різних галузях як дискретної так і неперервної математики. В більшості випадків ці задачі є *NP*-важкими і тому для пошуку субоптимальних розв’язків цих задач виправдано використання метаевристик. Однак і метаевристики мають низку недоліків. Зокрема, більшість метаевристик зорієнтовані для пошуку оптимальних розв’язків задач безумовної оптимізації. Наявність умов робить ці методи непридатними або призводить до їх індивідуалізації, налаштування на конкретний вузький клас задач. Щоб зберегти універсальність метаевристик можливі наступні підходи. Будується модель оптимізаційної задачі, в якій область допустимих рішень занурюється в універсальну множину відомої природи (наприклад, множину натуральних чисел, множину дійсних чисел, евклідовий простір R^n , цілочисельні решітки в евклідовому просторі, множина перестановок, множина всіх підграфів повного графа з заданою кількістю вершин, тощо). Постановка задач розширюється на весь простір пошуку, а в цільову функцію вводиться додатковий елемент –штраф досить великої величини за порушення умов задачі.

Інший спосіб – побудова накриваючого відображення. При такому підході будується сюр'єктивне відображення всього простору пошуку на область допустимих розв'язків задачі. При цьому задача умовної оптимізації перетворюється в задачу безумовної оптимізації, а всі умови ураховуються у накриваючому відображенні. Можлива і комбінація цих двох підходів.

Розглянемо один з методів побудови накриваючого відображення за рахунок побудови фрагментарної моделі оптимізаційної задачі.

Фрагментарна структура, фрагментарний алгоритм.

Нагадаємо поняття фрагментарної структури [1]. Фрагментарною структурою (X, E) на кінцевій множині X називається сімейство його підмножин $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, де $E_i \subseteq X$, таке, що $\forall E_i \in E, E_i \neq \emptyset \exists e \in E_i, E_i \setminus \{e\} \in E$.

Елементи множини E будемо називати допустимими фрагментами. Одноелементні підмножини, які є допустимими фрагментами, будемо називати елементарними фрагментами. Фрагмент називається максимальним, якщо він не є підмножиною ніякого іншого фрагмента.

Теорема. Якщо (X, E) – фрагментарна структура на множині X , то для будь якої непорожньої множини $A \in E$ існує нумерація її елементів $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ така, що $\forall k, k = \overline{1, n}$ множина $\{x_1, x_2, \dots, x_k\} \in E$.

З теореми випливає, що будь який максимальний фрагмент може бути побудовано за допомогою наступного "жадібного" алгоритму:

- а) елементи множини X лінійно упорядковуються;
- б) на початковому кроці обирається порожня множина: $X_0 = \emptyset$;
- в) на кроці з номером $k + 1$ обирається перший за порядком елемент $x \in X \setminus X_k$, такий, що $X_k \cup \{x\} \in E$. Останню умову будемо називати умовою приєднання;
- г) алгоритм закінчує роботу, якщо на черговому кроці не вдалося знайти елемент $x \in X \setminus X_k$ з відповідною властивістю.

Алгоритм побудови максимального фрагменту фрагментарної структури, який наведено вище, будемо називати фрагментарним алгоритмом.

Задача оптимізації на фрагментарній структурі, фрагментарна модель

Нехай задана фрагментарна структура $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ на кінцевій множині X . Нехай визначена монотонна за включенням функція - критерій $f : E \rightarrow R^1$, яка кожному допустимому фрагменту ставить у відповідність деяке дійсне число, тобто $\forall E_i, E_j \in E$ з умови $E_i \subseteq E_j$ випливає, що $f(E_i) \leq f(E_j)$ (або $f(E_i) \geq f(E_j)$). Задача оптимізації на фрагментарній структурі полягає у відшуванні допустимого фрагмента з максимальним (або мінімальним) значенням критерію. Очевидно, оптимальним розв'язком цієї задачі буде один із максимальних фрагментів. Принаймні максимальний фрагмент завжди є серед оптимальних розв'язків. Зазначимо, що умова максимальності фрагмента може бути обов'язковою у задачі оптимізації і без додаткових припущень про цільову функцію. Будь-яка задача оптимізації на фрагментарній структурі може бути зведена до комбінаторної задачі оптимізації на множині перестановок.

Таким чином маємо наступну комутативну діаграму відображень:

$$\begin{array}{ccc} S_n & & \\ \varphi \downarrow & \searrow f \circ \varphi & \\ E & \xrightarrow{f} & R^1 \end{array}$$

Тут φ - відображення, яке кожній перестановці ставить у відповідність допустимий фрагмент, який знаходиться за допомогою фрагментарного алгоритму. Відповідно задача оптимізації функції f на множині E зводиться до задачі безумовної оптимізації функції $f \circ \varphi$ на множині перестановок S_n . Фрагментарне уявлення вихідної задачі оптимізації називається фрагментарною моделлю цієї задачі. Таким чином наявність фрагментарної моделі дозволяє задачі умовної оптимізації переводити в задачі безумовної оптимізації на множині перестановок.

Фрагментарна модель для задач покриття.

Розглянемо фрагментарну модель задач покриття точок на площині.

Задача покриття множини точок на площині колами заданого радіусу.

Нехай задано набір точок $X = \{A_1(x_1, y_1), A_2(x_2, y_2), \dots, A_k(x_k, y_k)\}$ на площині заданих своїми координатами. Задача полягає в знаходженні мінімального числа кіл на площині, з центрами, які належать до множини X , мають заданий радіус r і містять всі обрані точки. Фрагментами в моделі цієї задачі можна вважати набори номерів кіл радіуса r з центрами в заданих точках. Номером кола вважається номер точки-центра кола. На кожному кроці фрагментарного алгоритму розглядається коло радіуса з центром у черговій точці. Умова приєднання – хоча б одна з точок множини, що охоплюється цим колом, ще не входить в покриття. Алгоритм закінчує роботу коли всі точки будуть охоплені покриттям.

Цей алгоритм без суттєвих змін може бути розповсюджений і на більш складну задачу, коли розглядається не набір кіл однакового радіуса, а набір більш складних фігур, кожна з яких містить відповідну точку. Простір в якому знаходяться обрані точки також може бути багатовимірним.

Задача покриття графу зірками, що не перетинаються

Задача полягає в знаходженні в заданому зваженому графі множини зірок, які не перетинаються у вершинах, та містять всі вершини графа. В цієї задачі можна в якості елементарних фрагментів обрати окремі ребра графа[2]. Умова приєднання ребра – воно є або променем вже існуючої зірки (тобто одна співпадає з вершиною вже побудованої зірки, а інша вільна, або дві вершини ребра вільні і ребро утворює нову зірку)

Задача цілочисельного прямокутного пакування в напівобмежену смугу

Задається кілька видів прямокутників зі сторонами, довжина та ширина яких виражається цілим числом, та їх кількість. Відома ширина напівобмеженої смуги, в яку упаковуються фігури. Потрібно знайти таке розміщення заданих прямокутників на смугі, при якому висота зайнятої частини смуги є мінімальною. При цьому прямокутники повинні розташовуватись строго в межах смуги, не перетинаючи один з одним окрім границь. Додатково, за умовою завдання, може допускатися обертання прямокутників під прямим кутом, при цьому мається на увазі, що сторони кожного прямокутника, що розміщується, паралельні сторонам смуги. Елементарними фрагментарної в цьому випадку можуть бути ізометричні вкладання прямокутників до смуги. Умова приєднання – черговий прямокутник вкладається в смугу за правилом Top-Left (у верхній лівий вільний кут смуги) без перетинання з вже вкладеними прямокутниками. На жаль в цієї моделі не завжди

може бути знайдено оптимальний розв'язок задачі. Але доведено [3], що за рахунок додавання одиничних прямокутників, а потім їх вилучення з кінцевого розв'язку, може бути отриманий оптимальний розв'язок задачі.

Задача покриття плоских фігур

Задача покриття фігур складної форми на 2-мірній площині може бути зведена до задачі покриття множини точок на площині за рахунок відповідної дискретизації. А саме фігура, що покривається, а також елементи покриття апроксимуються фігурами, що складаються з одиничних квадратів. За рахунок вибору масштабу таку апроксимацію можна зробити досить точною. Кожний з квадратів замінюється точкою, що співпадає з його центром. В кожному елементі покриття обирається одна точка, яку будемо називати базовою. Кожна точка фігури – основи обирається в якості елементарного фрагмента фрагментарної структури. На черговому кроці елемент покриття додається до вже існуючого покриття за рахунок суміщення базової точки з черговою точкою основи. Умова приєднання серед нових точок покриття існує хоча б одна точка, що не належить покриттю отриманому на попередньому кроці. Алгоритм закінчує роботу, коли всі точки основи будуть належать побудованому покриттю.

Література

1. I.V. Kozin, N.K. Maksyshko, V.A. Perepelitsa Fragmentary Structures in Discrete Optimization Problems, Cybernetics and Systems Analysis , Volume 53, No 6, 2017, P931–936, doi:10.1007/s10559-017-9995-6
2. Kozin I.V., Maksyshko N.K., Perepelitsa V.A., A Fragmented Model for the Problem of Land Use on Hypergraphs, Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 56, No. 5, 2020, P753-757, doi:10.1007/s10559-020-00295-w
3. Kozin, I.V., Batovskyi, S.E. Fragmentary Structures in a Two-Dimensional Strip Packing Problem. Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 55, No 6, 2019, P943–948, doi:10.1007/s10559-019-00204-w

РОБОТА З ГРАФАМИ У СИСТЕМІ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ GAP (ДЕМОНСТРАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ)

Олександр Коновалов

Школа комп'ютерних наук, Університет Сент-Ендрюс, Шотландія

EXPLORING GRAPHS USING THE COMPUTATIONAL ALGEBRA SYSTEM GAP (SOFTWARE DEMO)

Olexandr Konovalov

School of Computer Science, University of St Andrews, UK

Далі наводиться презентація доповіді:

Exploring graphs using the computational algebra system GAP (software demo)

Olexandr Konovalov

University of St Andrews

oleksandr.konovalov@st-andrews.ac.uk

<https://oleksandr.konovalov.github.io>



Combinatorial configurations and their applications
Zaporizhzhia - Kropyvnytskyi - Kyiv
4-6 June 2025



- Installation
- About
- Documentation
- GAP Packages
- How to cite GAP
- FAQ
- Contact
- The GAP Logo
- GAP on GitHub

Search GAP

GAP on GitHub



Groups Algorithms Programming

GAP – A System for Computational Discrete Algebra

What is GAP?
GAP is a system for computational discrete algebra, with particular emphasis on Computational Group Theory. GAP provides a programming language, a library of thousands of functions implementing algebraic algorithms written in the GAP language as well as large data libraries of algebraic objects. See [here](#) for details of the mathematical capabilities. The system, including source, is distributed **freely**. You can study and easily modify or extend it for your special use.

How to obtain GAP?
The current version is **GAP 4.14.0** released on 05 December 2024 and it can be obtained from our [install page](#). Changes from earlier versions are described in the [Release History](#).

We are looking forward to hearing from you!
We welcome contributions to GAP. The GAP development repository is hosted on [GitHub](#). You may find some guidance on contributing via [GitHub here](#). If you have any questions, or suggestions for GAP, the repository, or documentation, feel free to contact us via the [open GAP development mailing list](#) or submit an issue or a pull request on GitHub. There is an [extensive documentation](#) advising how to write a GAP code. Also there is a [guidance on developing a GAP package](#) and its [submission to GAP](#).

<https://www.gap-system.org/>

Edit this page

Dark mode

This site uses Just the Docs, a documentation theme for jekyll.

```

I GAP I GAP4.12.0 of 20220818
      https://www.gapsystem.org
Architecture: x86_64-apple-darwin21-default164kv8
Configuration: gmp6.2.1, GASNAN
Loading the library and packages ...
Packages: AClib 1.3.2, Alnuth 3.2.1, AtlasRep 2.1.4, AutoDoc 2022.07.10, AutPGrp 1.11, Browse 1.8.14, CorotInterface 2.3.4,
CRISP 1.4.5, Cryst4 1.1.25, CrystCot 1.1.10, CTblLib 1.3.4, FoctInt 1.6.3, FGA 1.4.0, Forms 1.2.8, GAPDoc 1.6.6,
gens 1.6.7, I0 4.7.2, IRREDSOL 1.4.3, LAGUNA 3.9.5, orb 4.8.5, Polento 1.3.10, Polycyclic 1.2.16, PrimGrp 3.4.2,
RodRoot 2.9, recog 1.3.2, ResClosures 4.7.3, SmallGrp 1.5, Sophus 1.27, SpinSym 1.5.2, TomLib 1.2.9,
TransGrp 3.6.3, utils 0.76
Try '?help' for help. See also '?copyright', '?cite' and '?authors'
lgap> S:=SymmetricGroup(3);
Sym([ 1 .. 3 ])
      pASLs)
      , 2,3 , 1,2 , 1,2,3 , 1,3,2 , 1,3
lgap> CharacterTable(S) ;
CharacterTableSym([ 1 .. 3 ])
lgap> Display(last) ;
CT1

      2 1 1
      3 1 . 1

      1a 2a 3a
      2P 1a 1a 3a
      3P 1a 2a 1a

X.1 1 -1 1
X.2 2 . -1
X.3 1 1 1
lgap> NrSnnlGroups(1824) ;
49487367289

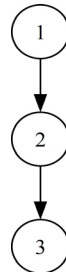
```

Working with GAP interactively

```

gap> D := Digraph([ [2], [3], [] ]);
<immutable digraph with 3 vertices, 2 edges>
gap> Splash(DotDigraph(D));
gap> mat := AdjacencyMatrix(D);
[[ [ 0, 1, 0 ], [ 0, 0, 1 ], [ 0, 0, 0 ] ]
gap> Display(mat);
[[ [ 0, 1, 0 ],
[ 0, 0, 1 ],
[ 0, 0, 0 ] ]
gap> n := DigraphNrVertices(D);
3
gap> for i in [1..n] do
> Print(mat[i], "\n");
> od;
[ 0, 1, 0 ]
[ 0, 0, 1 ]
[ 0, 0, 0 ]
gap>

```



Reading GAP code from a file

```
LoadPackage("digraphs");
```

```

is_symmetric := function(D)
  local mat, n, i, j;
  mat := AdjacencyMatrix(D);
  n := DigraphNrVertices(D);
  for i in [1..n-1] do
    for j in [i+1..n] do
      if mat[i][j] <> mat[j][i] then
        return false;
      fi;
    od;
  od;
  return true;
end;

```

Content of "graphs.g"

```

gap> Read("graphs.g");
gap> is_symmetric(D);
false
gap> S:=DigraphSymmetricClosure(D);
<immutable symmetric digraph with 3 vertices, 4 edges>
gap> Display(AdjacencyMatrix(S));
[[ [ 0, 1, 0 ],
[ 1, 0, 1 ],
[ 0, 1, 0 ] ]
gap> is_symmetric(S);
true
gap>

```

Documentation | GAP

gap-system.org/doc/

Groups Algorithms Programming

Installation

About

Documentation

Learning

Teaching Material

GAP Packages

How to cite GAP

FAQ

Contact

The GAP Logo

GAP on GitHub

Search GAP

<https://www.gap-system.org/doc/>

GAP on GitHub

Documentation

There is a lot of written material telling about the functionality and use of GAP, providing information about algorithmic background and giving hints for writing own GAP code.

- Manuals**
 - The [Tutorial \(PDF\)](#) gives a first introduction to the system
 - The [Reference Manual \(PDF\)](#) with complete descriptions of all library functions and examples of their use.
 - The [CHANGES.md](#) file describes most essential changes between all GAP releases.
 - Each GAP package has its individual manual which you can access through the list of [packages](#).
- Learning GAP**

In addition to the [Tutorial](#) mentioned above there is a variety of material intended to help people to learn on their own the GAP language and the use of the GAP system. We have tried to organize links to such material somewhat according to the level and intended audience on the page quoted in the heading.
- Teaching Material**

GAP has been used in several places to support the teaching of a variety of courses. We are grateful to the colleagues who allowed us to point to some course material of such courses and we would appreciate to obtain access to further such material. We hope that this can be helpful to colleagues intending a similar use of GAP, but it may also be used by students studying the topics of such courses.
- Bibliographies**
 - There is a [Google Scholar profile](#) for the GAP system and some of its packages, where citations are added automatically as soon as they

The Carpentries

About Us | Learn | Volunteer | Report Us | Communication | Search

I want to

The Carpentries teaches foundational coding and data science skills to researchers worldwide.

The Carpentries has built a community of

5106 INSTRUCTORS	185 TRAINERS	4687 WORKSHOPS	71 COUNTRIES
---------------------	-----------------	-------------------	-----------------

[Join our community](#)

<https://carpentries.org/>



Programming with GAP

Key Points

Glossary

Learner Profiles

More ▾

Search the All In One page

EPISODES

• Summary and Setup

Windows

macOS

Linux

1. First session with GAP

2. Some more GAP objects

3. Functions in GAP

4. Using regression tests

Collapse <

[Next: First session with...](#) →

Summary and Setup

GAP is a system for discrete computational algebra, with particular emphasis on Computational Group Theory. GAP provides a programming language, a library of thousands of functions implementing algebraic algorithms written in the GAP language as well as large data libraries of algebraic objects, for example the [Small Groups Library](#) which contains, among others, all 423 164 062 groups of order at most 2000 except 1024.

This lesson gives an introduction to GAP. It is centred around a common task of searching in the Small Groups Library for interesting examples and counterexamples, and a particular research problem in which we will be interested is to find examples of non-trivial groups such that the average order of their elements is an integer.

ukrainian-carpentries

Українська Спільнота The Carpentries

English version

The Carpentries – це міжнародний волонтерський проєкт, який допомагає надіюватися вчителі сучасної освіти необхідні для роботи з кодом та даними.

Ця сторінка Української спільноти The Carpentries. Деякі з наших проєктів з перекладу навчальних матеріалів The Carpentries на українську мову наведені нижче.

Ми зустрінаємось щомісяця у четверту п'ятницю о 16:00 за Київським часом. Подальшу інформацію про наші зустрічі можна знайти тут: Діагностичний звіт про нашу діяльність станом на травень 2024 р. на сайті The Carpentries.

Переклади уроків

- [Контроль версій за допомогою Git](#) (Перекладачі: Олександр Конвалков, Софія Маріос, Олександр Мірошкін, Вероніка Шевченко)

Викладання

- [Попередні навчальні заходи із використанням наших матеріалів](#)
- [Шаблон для створення сторінки семінару](#) (містить також інструкції щодо інсталяції необхідного програмного забезпечення)

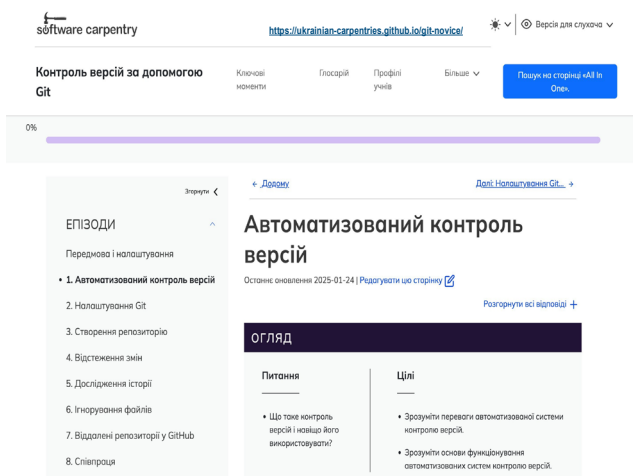
Глосарій

- [Багатомовний словник термінів, що використовуються в науці про дані](#)

Розглянути на GitHub



<https://ukrainian-carpentries.github.io/>



ОЦІНКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ АВТОНОМНИХ ГРУП АГЕНТІВ В ЛОКАЛЬНО-ЦЕНТРИЧНІЙ НАВІГАЦІЇ

Вячеслав Корольов, Максим Огурцов, Олег Рибальченко,
Олександр Ярушевський
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України

MATHEMATICAL MODEL OF AUTONOMOUS AGENT GROUP MOVEMENT EVALUTATION IN LOCAL-CENTRIC NAVIGATION

Vyacheslav Korolyov, Maksym Ogurtsov, Oleh Rybalchenko,
Oleksandr Yarushevskyi
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine

Abstract. A hybrid algorithm for optimizing the collective movement of drones in a relative coordinate system is proposed, combining the strengths of Particle Swarm Optimization (PSO) and the Potential Field Method (PFM). A set of evaluation criteria for swarm intelligence algorithms and methods applied to drone groups is formulated. Comparative analysis demonstrates that the proposed hybrid algorithm (RMO – Relative Motion Optimization) achieves balanced performance in collision avoidance.

The algorithms were compared using seven metrics, revealing the advantage of PSO in collision prevention and the high adaptability of PFM in obstacle-rich environments. RMO, in turn, proved optimal for scenarios with limited communication, making it promising for applications such as precision agriculture and urban monitoring. The use of energy-related data—namely, potential and kinetic energy, as well as overall energy expenditure—was shown to improve predictive collision avoidance, allow for real-time movement corrections, and eliminate the need for complex computations.

Вступ. Застосування груп рухомих роботизованих систем (PPC), які здатні автономно або напівавтономно виконувати завдання, стає дедалі поширенішим. Водночас акцент поступово зміщується з малих груп PPC на колективи агентів, керованих штучним інтелектом [1]. До таких завдань відносять переміщення товарів на автоматизованих складах [2], обробка хімікатами, додавання добрив і зрошення рослин [3], моніторинг сільськогосподарських угідь та ін.

Виконання завдань групами агентів PPC для різних технологічних сфер вимагають розробки алгоритмів і методів підтримки руху групи як єдиного об'єкту керування, стійкого до дії перешкод різного характеру з використанням алгоритмів локального позиціонування [4-5].

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка алгоритму, що базується на розв'язуванні оптимізаційних задач, які забезпечуватимуть автономний рух групи агентів з використанням локального позиціонування. Системи глобального позиціонування: супутникові або стільникові можуть навмисно вимикатись, бути фізично недоступними в індустріальних забудовах або мати недостатню точність для низки прикладних завдань. Розробка змістовної постановки задачі оптимізації руху автономних груп агентів з локальним позиціонуванням у відносній системі координат дозволить забезпечити ефективність переміщення групи PPC у заданій топологічній формі за адаптивно вибраним критерієм руху та без потреби у лідері групи, що є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз попередніх досліджень. Для керування групою PPC об'єднують у Ad-Нос мережі, які засновані на стандартах 802.11 або 802.15.4, що дозволяє підвищити надійність керування за допомогою ретрансляції пакетів даних і команд дистанційного керування [6]. Перевантаження радіочастотного спектра та багатопроменеве поширення і відбиття погіршують продуктивність позиціонування з використанням радіотехнічних методів, тоді як радіофізичні властивості супутникових сигналів обмежують їх ефективність у міських районах, закритих складських приміщеннях та ін.

Організація руху групи агентів як єдиного цілого ґрунтується на використанні низки відомих підходів до керування колективом агентів [6-8]: алгоритм Вічека (Vicsek), алгоритм Рейнольдса (Boids), метод потенціалів (Potential Field Method – PFM), а також алгоритми колективного інтелекту (Swarm Intelligence, SI), наприклад, алгоритм оптимізації рою частинок (Particle Swarm Optimization – PSO). Зокрема є комбіновані рішення: Virtual Collaborative Network, Olfati-Saber's flocking algorithm та ін. Ці алгоритми ґрунтуються на адаптивному використанні кількох алгоритмів в залежності від умов руху, наприклад, алгоритму Рейнольдса для руху групи без перешкод та методу потенціалів для руху між фізичними перешкодами, які треба оминати, а також застосуванні алгоритму Вічека для руху групи з тимчасовим лідером в динамічному середовищі, що потребує високої швидкості реакції на загрози цілісності групі, наприклад, на зграї диких птахів або кижих звірів.

На думку авторів, для моделювання руху групи PPC з відомими масами агентів важливо враховувати значення середньої і максимальної кінетичної і потенціальної механічної енергії агентів у групі під час її переміщення, а також досліджувати ймовірність зіткнень агентів в умовах, коли координати і відстані між ними вимірюються з похибками. Дослідженню потенціальної та кінетичної енергії під час рівномірного прямолінійного руху груп PPC, а також ймовірності зіткнень між членами групи присвячена низка наукових робіт [9-14].

Основна частина. Комбінування алгоритмів Vicsek, Boids, PFM, PSO дозволило розробити адаптивний мета алгоритм руху дронів, що поєднує переваги об'єднаних у нього алгоритмів – **алгоритм оптимізації колективного руху (ОКР)**. Він означає підхід до координації руху дронів, у якому кожен дрон приймає рішення на основі лише локальної інформації, тобто відстаней і кутів до найближчих сусідів, без доступу до глобальних координат. Це підхід, подібний до моделі Boids, де дрони взаємодіють через локальні правила вирівнювання, притягання та уникнення зіткнень. ОКР PPC зазвичай не потребує лідера, оскільки рішення про рух приймаються індивідуально кожним дроном на основі локальної інформації. Для прискорення реагування на перешкоди руху або при ускладненні комунікації між дронами може бути введена концепція глобального орієнтира, що відіграє роль узагальненого "лідера", який визначається децентралізовано через локальні рішення дронів. Правила руху і взаємодії дронів у локально-орієнтованому рої можуть бути визначені за аналогією до моделі Рейнольдса (Boids), але із суттєвими відмінностями через відсутність глобальних координат. У локально-

орієнтованому рої, де дрони мають лише інформацію про відстані d_{ij} і кути θ_{ij} , ці правила можуть бути модифіковані таким чином: вирівнювання базується на порівнянні відносних кутів сусідів θ_{ij} , а не абсолютних швидкостей. Однорідність визначається як мінімізація відхилень від заданих відстаней d_{ij} . Відштовхування враховує локальні виміри для уникнення скупчень.

Переваги запропонованого алгоритму: врахування як відстаней, так і кутів у цільовій функції; використання виключно локальних даних без глобальних координат; явне моделювання уникання зіткнень через потенціальні поля; децентралізована оптимізація, що забезпечує масштабованість.

Використання даних про кінетичну і потенціальну енергію для моделей керування рухом групи агентів. Врахування величин потенціальної та кінетичної енергії, а також їхніх середніх та максимальних значень для групи агентів, та розуміння динаміки енергії дозволяє розробляти більш ефективні траєкторії польоту, мінімізуючи непотрібні витрати енергії. Це має вирішальне значення для розширення дальності польоту РРС, особливо в групових формуваннях, де колективна економія енергії може бути значною [15-16].

Хоча існує чимало досліджень моделей споживання енергії та стратегій уникнення зіткнень у групах РРС, лише поодинокі дослідження зосереджені на середніх і максимальних значеннях потенціальної та кінетичної енергії під час рівномірного прямолінійного руху, а також детальному аналізу ймовірностей зіткнень між членами групи. Втім наявні результати аналізу є обмеженими, або розгляд явно не виконаний в поточній науковій літературі.

Для обчислення середніх і максимальних значень потенціальної і кінетичної енергії для групи агентів можна використати наступні залежності. Кінетична енергія обчислюється через швидкість агентів (квадрат модуля вектора швидкості). Потенціальна енергія визначається через висоту агента у гравітаційному полі.

Середня кінетична енергія (середнє значення кінетичної енергії всіх агентів):

$$\bar{E}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m \|\vec{v}_i\|^2,$$

де N – кількість агентів, m – маса агента, $\|\vec{v}_i\|$ – швидкість i -го агента.

Максимальна кінетична енергія (максимальне значення серед усіх агентів):

$$E \max_{1 \leq i \leq N} \left(\frac{1}{2} m \|\vec{v}_i\|^2 \right)_{kmax}.$$

Середня потенційна енергія (середнє значення потенційної енергії всіх агентів):

$$\bar{E}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N mgh_i,$$

де g – прискорення вільного падіння, h_i – висота i -го агента, для двовірного випадку $h_i = y_i$ – координата.

Максимальна потенційна енергія (максимальне значення серед усіх агентів):

$$E \max_{1 \leq i \leq N} (m \cdot g \cdot h_i)_{p \max}.$$

Ці формули використовуються для обчислення енергії агентів, у симуляції, що дозволяє оцінити їх динаміку та взаємодію.

Аналізуючи потенційну та кінетичну енергію, алгоритми роїв можна вдосконалити. Оцінки потенційних енергій, пов'язаних з позиціями дронів у групі, дозволяють алгоритмам краще передбачати й запобігати потенційним зіткненням РРС [16]. Знання кінетичної енергії допомагає дронам приймати обґрунтовані рішення у реальному масштабі часу щодо швидкості та маневреності, дозволяючи їм динамічно регулювати траєкторії, щоб уникати перешкод та інших дронів, таким чином зменшуючи ймовірність зіткнень [15, 17-18]. Розуміння того, як потенційна та кінетична енергія змінюються зі зміною умов навколишнього середовища (наприклад, вітру чи рельєфу), дозволяє розробляти адаптивні стратегії, які покращують загальну продуктивність місії [18].

Завдяки оптимізації споживання енергії шляхом врахування в алгоритмах руху кінетичної та потенційної енергії, зграї дронів можуть працювати більш стабільно протягом тривалих періодів часу, тобто забезпечувати довгострокову стійкість переміщень, що важливо для моніторингу навколишнього середовища або реагування на стихійні лиха, де може бути потрібною саме безперервна робота [15, 17].

Таким чином, інтеграція аналізу потенційної та кінетичної енергії в операції груп дронів не тільки підвищує ефективність і безпеку, але також сприяє більш ефективному виконанню завдань і стійкості в перелічених раніше моделях керування.

Розробка критеріїв оцінки якості моделювання керування групою дронів. Для оцінки якості роботи алгоритмів або методів

утримання групи дронів у заданому околі під час руху можна використати наступні метрики.

1. Середня відстань між дронами. Метрика дозволяє оцінити наскільки дрони знаходяться близько один до одного, тобто згуртованість колективу дронів:

$$D_{min} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \|p_i - p_j\|,$$

де p_i і p_j – позиції дронів i та j , а N – загальна кількість дронів.

2. Максимальна відстань між дронами. Метрика дозволяє визначити ступінь віддаленості дронів від зграї. Менше значення означає кращу згуртованість групи дронів:

$$D_{max} = \max_{i,j} \|p_i - p_j\|.$$

3. Середнє відхилення від цільової позиції. Метрика дозволяє оцінити наскільки дрони зберігають свою цільову позицію у формації. Менше значення відхилення вказує на кращу стабільність формації:

$$C_{med} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - o_i\|,$$

де o_i – цільова позиція дрона i .

4. Кількість зіткнень. Метрика дозволяє оцінити ступінь результативності уникнення зіткнень дронами. Менша кількість зіткнень дронів вказує на кращу роботу алгоритму:

$$A = \sum_{i=1}^{N\Sigma} \sum_{j=1, j \neq i}^{N\Sigma} 1(\|p_i - p_j\| < d_{min}),$$

де d_{min} – мінімальна допустима відстань між дронами, а $1(.)$ – індикаторна функція, яка дорівнює "1", якщо умова виконується та дорівнює "0" – в іншому випадку.

5. Середня швидкість дронів. Метрика дозволяє оцінити наскільки швидко рухаються дрони групи. Оптимальне значення швидкості може залежати від конкретної задачі:

$$S_{med} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|v_i\|,$$

де v_i – швидкість дрона i .

6. Стабільність формації. Метрика дозволяє оцінити стабільність збереження дронами формації. Менше значення відхилення дронів від цільової формації вказує на кращу стабільність:

$$F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i(t) - o_i(t)\|,$$

де T – кількість кроків симуляції, $p_i(t)$ і $o_i(t)$ – виміряна позиція та цільова позиція дрона i на кроці t .

7. Енергоефективність. Метрика показує значення витрат енергії на одиницю відстані групою дронів для підтримки руху у формації. Менше значення витрат енергії вказує на кращу роботу алгоритму:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_0^T \|a_i(t)\| dt,$$

де $a_i(t)$ – прискорення дрона i на кроці t .

Було виконано симуляцію для 100 дронів з усередненням по 1000 запусків з випадковими початковими позиціями. Результати симуляцій зведені у таблицях 5 і 6. Середня швидкість руху дронів фіксована. Час симуляції склав приблизно 11 хвилин у безкоштовному середовищі colab.google.

Порівняння показників у таблицях 1 і 2 демонструє відповідність експериментальних даних до теоретичних показників, що складає 13/28 (46.3%). Під "зіткненням" розуміється наближення дронів на відстань, що менше встановленого обмеження у постановці задачі оптимізації.

Таблиця 1

Результати симуляції для алгоритмів і методів в абсолютних величинах

Метрика	Vicsek	Boids	PSO	PFM	ОКР
Середня відстань між дронами	277.26	414.96	3.14	127.39	14.47
Максимальна відстань між дронами	1120.33	1150.81	7.82	285.11	42.89
Середнє відхилення від цільової позиції	191.71	401.76	2.36	487.78	224.65
Кількість зіткнень	157.0	6.0	4366.0	72.0	416.0

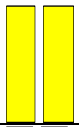
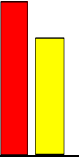
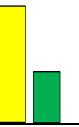
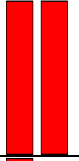
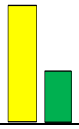
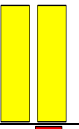
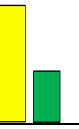
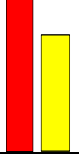
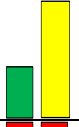
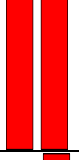
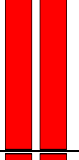
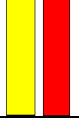
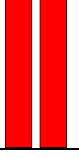
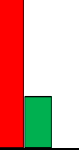
Стабільність формації	0.05	0.02	0.81	0.02	0.04
Енергоефективність	0.02	0.01	0.46	0.04	0.25
Середня кінетична енергія	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Максимальна кінетична енергія	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Середня потенціальна енергія	932.68	1835.72	242.73	528.54	248.24
Максимальна потенційна енергія	5936.22	5979.45	280.89	1350.67	409.96

При фіксованій середній швидкості і випадкових значеннях позицій дронів, тобто при відсутності руху за траєкторією, оцінки максимальної і середньої кінетичної енергії дронів та їх групи не дають додаткової інформації, але у складніших моделях руху результати будуть іншими.

Висновки. Запропоновано гібридний алгоритм – оптимізація колективного руху дронів у відносній системі координат, який поєднує переваги PSO та PFM. Сформульовано набір критеріїв для оцінки якості роботи алгоритмів і методів ройового інтелекту для групи дронів та виконано порівняння алгоритмів, що показало збалансованість оцінок для алгоритму ОКР для запобігання зіткнень: середня відстань між дронами склала 14.47 одиниць, що на 45% менше, ніж у Boids. Кількість зіткнень зменшилася до 416 за 1000 симуляцій, а енергоефективність покращилася на 20% порівняно з Vicsek.

Проведено порівняння алгоритмів за сімома метриками, що показало перевагу PSO у запобіганні зіткненням і високу адаптивність PFM до перешкод, тоді як ОКР є оптимальним для сценаріїв із обмеженою комунікацією. Це робить ОКР перспективним для застосування в умовах обмеженої комунікації, зокрема в сільському господарстві та урбаністичному моніторингу. Визначено, що використання даних про енерговитрати, потенційну, кінетичну енергію дозволяє краще передбачати рух для уникнення зіткнень, надавати відповідні корекції та не потребує складних обчислень. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію шумостійких сенсорів та тестування в реальному масштабі часу.

Таблиця 2
Порівняння теоретичних результатів алгоритмів ройування дронів із симуляціями на основі якісних метрик

Метрика	Vicsek	Boids	PSO	PFM	OKP
Середня відстань між дронами					
Максимальна відстань між дронами					
Середнє відхилення від цільової позиції					
Кількість зіткнень					
Стабільність формації					
Енергоефективність					

Література
1. Alqudsi, Y., & Makaraci, M. (2025). UAV swarms: research, challenges, and future directions. Journal of Engineering and Applied Science, 72(1), 12.

2. Ogurtsov, M., Korolyov, V., Khodzinsky, O., & Rybalchenko, O. (2024). Development of relative positioning algorithms for agricultural drone swarms in GPS-challenged environments.
3. Korolyov, V. Y., Ogurtsov, M. I., Rybalchenko, O. V., & Khodzinskyi, O. M. (2024). Development of the local navigation algorithm of the agricultural UAVS flock during swarm movement. *PROBLEMS IN PROGRAMMING*, (2-3), 155-162.
4. Džunda, M., Dzurovčin, P., Čikovský, S., & Melníková, L. (2024). Determining the Location of the UAV When Flying in a Group. *Aerospace*, 11(4), 312.
5. Di, C., & Guo, X. (2024). Topology Perception and Relative Positioning of UAV Swarm Formation Based on Low-Rank Optimization. *Aerospace*, 11(6), 466.
6. Zhao, G., Cui, H., Hua, C., & Liu, S. (2024). Cooperative Control of Multi-agent Systems.
7. Nguyen, L. V. (2024). Swarm Intelligence-Based Multi-Robotics: A Comprehensive Review. *AppliedMath*, 4(4), 1192-1210.
8. Chao, W. A. N. G., Zhang, S., Tianhang, M. A., Yuetong, X. I. A. O., Chen, M. Z., & Lei, W. A. N. G. (2025). Swarm intelligence: A survey of model classification and applications. *Chinese Journal of Aeronautics*, 38(3), 102982.
9. Bu, Y., Yan, Y., & Yang, Y. (2024). Advancement challenges in UAV swarm formation control: A comprehensive review. *Drones*, 8(7), 320.
10. Hulianytskyi, L., & Ogurtsov, M. (2023). The Improved Algorithm for Reducing the UAV Swarm Radio Visibility. In *IT&I* (pp. 340-351).
11. Sun, Z., Xu, C., Wang, G., Lan, L., Shi, M., Xing, X., & Liao, G. (2023). An Enhanced Energy-Efficient Data Collection Optimization Algorithm for UAV Swarm in the Intelligent Internet of Things. *Drones*, 7(6), 373.
12. Dong, Z., Wu, Q., & Chen, L. (2023). Reinforcement learning-based formation pinning and shape transformation for swarms. *Drones*, 7(11), 673.
13. Zhang, X., & Duan, L. (2020). Energy-saving deployment algorithms of UAV swarm for sustainable wireless coverage. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(9), 10320-10335.
14. Olfati-Saber, R. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on automatic control*, 51(3), 401-420.
15. Mirzaeinia, A., Hassanalain, M., Lee, K., & Mirzaeinia, M. (2019). Energy conservation of V-shaped swarming fixed-wing drones through position reconfiguration. *Aerospace Science and Technology*, 94, 105398.

16. Yasin, J. N., Mahboob, H., Haghbayan, M. H., Yasin, M. M., & Plosila, J. (2021). Energy-efficient navigation of an autonomous swarm with adaptive consciousness. *Remote Sensing*, 13(6), 1059.

17. Cabuk, U. C., Tosun, M., Dagdeviren, O., & Ozturk, Y. (2024). Modeling energy consumption of small drones for swarm missions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(8), 10176-10189.

18. Yang, Y., Zhang, X., Zhou, J., Li, B., & Qin, K. (2022). Global energy consumption optimization for UAV swarm topology shaping. *Energies*, 15(7), 2416.

ДИЗАЙН ЗМАГАНЬ ЯК ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИЛЬНОЇ КОМАНДИ

Антон Рябенко, Анна Бакурова, Еліна Терещенко
Національний університет «Запорізька політехніка»

COMPETITION RULES AS THE TOOL FOR BUILDING A STRONG TEAM

Anton Ryabenko, Anna Bakurova, Elina Tereshchenko
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. The objective of this study is to enhance the productivity of teamwork by optimally selecting participants who exhibit the highest levels of cooperative performance. A highly effective team is defined as one composed of individuals who demonstrate superior interaction efficiency in pairs. The methodological foundation of the research is based on the selection of a competition design tailored to team formation, with particular attention to the dynamics of competitive interaction. The problem is formally modeled using graph theory, where a complete undirected weighted graph is employed. In this representation, vertices correspond to potential participants, and edge weights quantify the quality of interaction between pairs of individuals. Admissible solutions are defined as coverings of the graph by cliques, where each clique represents a team and its size is determined by the predefined team size. The study introduces a mathematical formulation of a bi-criteria optimization problem, employing the MAXSUM and MAXMIN criteria. The MAXSUM criterion assesses the overall effectiveness of the teams formed, while the MAXMIN criterion identifies the solution that maximizes the minimum edge weight within each clique—thus addressing the "weakest link" problem. The two-criteria objective

function yields a Pareto set composed of all non-dominated (Pareto-optimal) solutions within the feasible solution space. Furthermore, the paper presents a method for constructing a competition design that accounts for practical constraints on the number of competitions needed to explore the solution space. Additionally, it outlines strategies for reducing the size of this search space without compromising the statistical significance of the results.

Протягом щонайменше п'яти десятиліть тривають дослідження, присвячені вивченню командної роботи. Об'єктом таких досліджень виступає «команда» як динамічна система, що здатна еволюціонувати, адаптуватися до впливу зовнішнього середовища та трансформуватися з часом у результаті взаємодії між її учасниками. Такий підхід актуалізує необхідність формалізації постановок задач та описів командної діяльності, визначення критеріїв якості, розробки методів оцінювання ефективності командної взаємодії, а також побудови експериментальних досліджень.

Представлена робота присвячена проблемі формування команди на основі фактора змагання. Під фактором змагання розуміється гра між двома командами, за підсумками якої визначаються переможець і команда, що зазнала поразки. Вважається, що перемога команди зумовлена ефективною взаємодією між її учасниками. Продуктивність взаємодії між парою учасників визначається як високоефективна, якщо ця пара брала участь у складі команди, що здобула перемогу. Серія змагань складається з окремих матчів, у кожному з яких беруть участь команди з однаковою кількістю учасників. На основі інформації про склад команд та результати ігор після завершення серії змагань проводиться оцінка ефективності взаємодії кожної пари учасників. Отримані оцінки слугують підґрунтям для подальшого формування команд. Метою проведення змагальної серії є точне визначення значень ваг ребер графа взаємодій, які відображають продуктивність парної взаємодії. Для практичного застосування запропонованого підходу необхідною є розробка ефективного дизайну змагань. Під дизайном розуміється процедура вибору кількості учасників у складі кожної команди (залежно від загальної кількості учасників n), а також визначення необхідної кількості змагань k . Розроблений дизайн має забезпечувати ефективне виявлення пар учасників із найвищою продуктивністю взаємодії.

Метою даного дослідження є формалізація методу побудови дизайну змагань, орієнтованого на формування команд із високим рівнем взаємодії між її учасниками. В роботі [1] авторами представлено математичну модель формування множини команд на повному

неорієнтованому графі $G = (V, E)$, $|V| = n$, $|E| = \frac{n(n-1)}{2}$. Множина вершин $V = \{v_i | i = \overline{0, n-1}\}$ відповідає множині незалежних учасників, які необхідно об'єднати в m команд з заданою кількістю k гравців в кожній команді. Кожне ребро $e_{ij} \in E$ має чисельну вагу w_{ij} , яка відображає рівень продуктивності співпраці двох учасників v_i та v_j . Допустимим розв'язком задачі є незв'язний підграф $x = (\tilde{V}, \tilde{E})$, $\tilde{V} \subset V$, $\tilde{E} \subset E$, компонентами зв'язності якого є m клік розмірності k . Кожна кліка об'єднує k гравців однієї команди. Кількість клік $m = \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$, де $\left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$ - ціла частина від відношення $\frac{n}{k}$. Кількість вершин $r = |V \setminus \tilde{V}| = n - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor k$ відповідає кількості учасників, що не ввійдуть в жодну з команд. Якщо n є кратним k , то $r = 0$. Множину всіх допустимих розв'язків (МДР) на графі $G = (V, E)$ позначимо через $X = X(G) = \{x\}$. На МДР визначимо векторну цільову функцію (ВЦФ):

$$F = (F_1, F_2), \quad (1)$$

що складається з критеріїв:

$$MAXSUM: F_1 = \sum_{e_{ij} \in \tilde{E}} w_{ij} \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$MAXMIN: F_2 = \min_{e_{ij} \in \tilde{E}} w_{ij} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Перший критерій оцінює загальний рівень продуктивності всіх команд. Другий критерій оцінює “найслабкішу ланку”, дозволяючи обрати варіант, при якому максимізуються мінімальні ваги ребер підграфу x . ВЦФ визначає в МДР паретівську множину (ПМ) $\tilde{X}$, що складається з усіх паретівських оптимумів. Будемо розглядати алгоритмічну проблему знаходження повної множини альтернатив (ПМА) X^0 , яка є підмножиною ПМ мінімальної потужності і при цьому виконується умова $F(X^0) = F(\tilde{X})$. Для визначення потужності МДР застосовується формула для неупорядкованого розбиття множини потужністю n на підмножини, серед яких для кожного $i = \overline{1, n}$ існує $m_i \geq 0$ з i елементами, де $\sum_{i=1}^n i m_i = n$, тоді потужність визначимо за формулою:

$$N(m_1, m_2, \dots, m_n) = \frac{n!}{m_1! m_2! \dots m_n! (1!)^{m_1} (2!)^{m_2} \dots (n!)^{m_n}} \quad (4)$$

В випадку, коли існують учасники, що не увійшли до жодної команди, $r = n - \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor k$ учасників, $r < k$, тоді розбиття множини учасників на команди є невпорядкованим розбиттям множини з потужністю n на m підмножин однакової потужності k та одну підмножину потужності r , тобто $km + r = n$. Тоді потужність МДР визначаємо формулою

$$|X| = \frac{n!}{1! m! (r!)^1 (k!)^m} = \frac{n!}{m! r! (k!)^m}. \quad (5)$$

Загальна кількість команд N_{ij} , до складу яких входили учасники v_i та v_j , визначається кількістю можливих розбиттів підмножини всіх учасників потужності $n - 2$, так як одну пару зафіксовано, а всі інші учасники розбиваються на команди з k гравцями. Тоді формула (5) приймає вид

$$N_{ij} = |X_{n-2}| = \frac{(n-2)!}{\left\lfloor \frac{n-2}{k} \right\rfloor! ((n-2) - \left\lfloor \frac{n-2}{k} \right\rfloor k)! (k!)^{\left\lfloor \frac{n-2}{k} \right\rfloor}}. \quad (6)$$

Отже, для розрахунку реберної ваги w_{ij} будемо використовувати формулу:

$$w_{ij} = \frac{\widetilde{N}_{ij}}{N_{ij}}, \quad (7)$$

де $\widetilde{N}_{ij}$ - кількість перемог команд, до складу яких входили учасники v_i та v_j , N_{ij} - загальна кількість команд, до складу яких входили учасники v_i та v_j .

Етапи по створенню дизайну змагань [2,3].

Етап 1. Для визначеної кількості учасників n проаналізувати кількість команд $m = \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$ в залежності від кількості гравців k . Сформувати множину

$$A = \left\{ (n, k) \mid m = \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor, m \geq 2 \right\}.$$

Етап 2. Для елементів множини A за формулою (7) розрахувати загальну кількість команд N_{ij} , до складу яких може входити пара учасників v_i та v_j . Розбити множину $A = \bigcup_{i=1}^2 A_i$ на підмножини:

$$A_1 = \left\{ (n, k) | N_{ij} = \frac{(n-2)!}{\left[\frac{n-2}{k}\right]!((n-2)-\left[\frac{n-2}{k}\right]k)!(k!)^{\left[\frac{n-2}{k}\right]}}, N_{ij} < 10 \right\}$$

довжина вибірки не дозволяє забезпечити статистичну значимість результатів перевірки статистичної гіпотези H_0 щодо випадкової події B ,

$$A_2 = \left\{ (n, k) | N_{ij} = \frac{(n-2)!}{\left[\frac{n-2}{k}\right]!((n-2)-\left[\frac{n-2}{k}\right]k)!(k!)^{\left[\frac{n-2}{k}\right]}}, N_{ij} > 9 \right\}$$

– довжина вибірки дозволяє забезпечити статистичну значимість результатів перевірки статистичної гіпотези H_0 щодо випадкової події B .

Етап 3. Визначаємо як досягти довжини вибірки, що дозволяє забезпечити статистичну значимість результатів перевірки статистичної гіпотези, тобто $N_{ij} > 9$, де N_{ij} визначається за формулою (6). Порівняємо, що є більш доцільним, повторити серію змагань для пар $(n, k) \in A_1$ чи скоротити серію змагань для пар $(n, k) \in A_2$. Якщо обрано $(n, k) \in A_1$, то визначаємо кількість повторень серії $10/N_{ij}$. Загальна кількість змагань

$$\aleph = |X| * \frac{10}{N_{ij}}.$$

Література

1. Riabenko, A., Tereschenko, E., Bakurova, A., Pyrozhok, A., Kuzkin, O. (2024). The graph theoretic formulation of the team formation problem based on the factor of competition. *Technology Audit and Production Reserves*, 25–30. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310570>.
2. Kuzkin, O. F., Raida, I. M., & Tereshchenko, E. (2025). Statistical Analysis Of Public Transport Passengers' Encounter Networks In The Context Of The Risk Of The Infectious Disease Spread. *Transport Development*, (1(24), 59-72. <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.05>
3. Рябенко А. Є., Бакурова А. В., Терещенко Е. В., Кузькін О. Ф., Матюхін А. Ю. Система підтримки прийняття рішень для створення високоефективних ко-манд // Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». – 2025. – №5

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ В МАРКЕТИНГУ ПОСЛУГ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ КОМБІНАТОРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ

Ірина Рясна, Олександр Сенько

Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України

FUZZY MODELS IN SERVICE MARKETING BASED ON FUZZY COMBINATORIAL CONFIGURATIONS

Iryna Riasna, Oleksandr Senko

V.M. Glushkov institute of cybernetics of the NAS of Ukraine

Abstract. The paper considers the segmentation of the service market in the presence of fuzzy quantitative and qualitative information. On the basis of the theory of fuzzy sets and the theory of representative measurements, the formal concept of a fuzzy segment is introduced. An approach to segmentation of the set of qualitative and quantitative information based on fuzzy combinatorial configurations using the fuzzy similarity relation and kernel of the proposed type is suggested.

Традиційні методи сегментування споживачів ринків послуг зазвичай базуються на чітких категоріях та чітких межах. Процес поділу потенційних споживачів на групи (сегменти) зі схожими потребами, характеристиками та поведінкою є однією із важливих складових маркетингу послуг. Сегментування дозволяє компаніям краще розуміти своїх клієнтів, адаптувати послуги та маркетингові стратегії для кожної групи, і тим самим підвищувати ефективність бізнесу. Математичні моделі сегментування ринку послуг, які використовуються для аналізу даних про споживачів, дозволяють автоматизувати процес сегментування, підвищити його точність та отримати більш глибоке розуміння структури ринків. Вибір певної математичної моделі залежить від типу даних, цілей сегментування та доступних ресурсів [1, 2].

Сегментування ринку послуг з використанням як нечіткої кількісної, так і якісної інформації, зокрема, за наявності експертного вербального опису характеристик його учасників, призводить до низки проблем, які необхідно враховувати при побудові адекватної математичної моделі. Розглянемо випадок, коли значення функцій належності нечітких множин, за допомогою яких проводиться моделювання кількісних і якісних характеристик, визначаються в шкалах вимірювання за класифікацією С. Стівенса, а саме, в шкалах порядку, відношень, інтервалів та абсолютних шкалах. Згідно репрезентативної теорії вимірювань [3], базовими поняттями якої є

емпірична система з відношеннями (ЕСВ) і математична система з відношеннями (МСВ), адекватність МВС необхідно забезпечити використовуючи інваріантні відношення. Таким чином, нечіткі відношення в МСВ повинні бути інваріантними за допустимих перетворень значень функцій належності нечітких множин. Таку інваріантність нечітких відношень у МВС забезпечуємо використанням коефіцієнта лінгвістичної кореляції [4, 5].

Основна частина. Наведемо формальну постановку задачі. Нехай X – лінійна упорядкована (перечисленням) скінченна множина елементів ЕСВ (суб'єктів ринку послуг), W – скінченна множина нечітких властивостей елементів множини X , визначених вербально. Результат вимірювань значень функцій належності в МСВ для сукупності нечітких властивостей $W = (w_1, \dots, w_n)$, n – кількість властивостей, може бути гомогенною або гетерогенною нечіткою множиною, функцію належності якої визначаємо так: $\mu_W : X \rightarrow L_1 \times \dots \times L_n$, де L_i – деяка ґратка, $\mu_W(x) = (\mu_1(x), \dots, \mu_n(x))$, $\mu_i : X \rightarrow L_i$, $i = \{1, \dots, n\}$. На основі гетерогенних нечітких множин можна будувати математичні моделі за наявності різнотипних властивостей, які вимірюються як за кількісними, так і за якісними шкалами.

Нехай властивість $w_i \in W$ має скінченну лінійно упорядковану множину $T_{w_i} = (t_1^i, \dots, t_{m(w_i)}^i)$ вербальних значень (ґрадацій, лінгвістичних термів), $m(w_i)$ – кількість цих значень.

Нехай $\tilde{G}_x^i = ((t_1^i, \eta_x^i(t_1^i)), \dots, (t_j^i, \eta_x^i(t_j^i)), \dots, (t_{m(w_i)}^i, \eta_x^i(t_{m(w_i)}^i)))$ – лінійно упорядкована гомогенна нечітка множина, яка є результатом вимірювань властивості $w_i \in W$ елемента $x \in X$, $\eta_x^i(t_j^i) \in [0, 1]$, $j = 1, \dots, m(w_i)$. Тоді, математичною моделлю множини емпіричних об'єктів $X \in$ нечітка множина $\tilde{X}$ у МСВ:

$$\tilde{X} = \left\{ \left(x, (\tilde{G}_x^1, \dots, \tilde{G}_x^n) \right) \right\}, \quad x \in X,$$

де елементом множини $\tilde{X}$ є упорядкована пара $\tilde{x} = (x, (\tilde{G}_x^1, \dots, \tilde{G}_x^n))$. Другий елемент упорядкованої пари є описом вимірювань множини

властивостей W відповідного елемента $x \in X$. Нечітка множина $\tilde{X}$ є гетерогенною нечіткою множиною, так як функцією належності для кожного $x \in X$ є сукупність n нечітких множин, значення функцій належності яких можуть вимірюватись за різними шкалами. Схожість між елементами $\tilde{x}, \tilde{y} \in \tilde{X}$, $\tilde{x} = \left(x, (\tilde{G}_x^1, \dots, \tilde{G}_x^n)\right)$, $\tilde{y} = \left(y, (\tilde{G}_y^1, \dots, \tilde{G}_y^n)\right)$, визначаємо як схожість між відповідними описами елементів $x, y \in X$, які є першими елементами упорядкованих пар. Відношення схожості $\tilde{R}'$ на множині $\tilde{X} \times \tilde{X}$ визначаємо за допомогою коефіцієнта лінгвістичної кореляції [5]. У такому випадку відношення схожості буде інваріантним за допустимих перетворень значень функцій належності нечітких множин, що визначають нечіткі властивості.

Нехай

$$\begin{aligned}\tilde{R}' &= \left\{((\tilde{x}, \tilde{y}), f_{\tilde{R}'}(\tilde{x}, \tilde{y})) \mid (\tilde{x}, \tilde{y}) \in \tilde{X} \times \tilde{X}\right\}, \\ \tilde{R} &= \left\{((x, y), f_{\tilde{R}}(x, y)) \mid (x, y) \in X \times X\right\},\end{aligned}$$

де $f_{\tilde{R}'}(\tilde{x}, \tilde{y})$ – функція належності нечіткого відношення $\tilde{R}'$, $f_{\tilde{R}}(x, y)$ – функція належності нечіткого відношення $\tilde{R}$. Згідно поняттю шкали у репрезентативній теорії вимірювань, покладемо $f_{\tilde{R}}(x, y) = f_{\tilde{R}'}(\tilde{x}, \tilde{y})$.

Нечітке відношення $\tilde{R}'$ є нечіткою комбінаторною конфігурацією (об'єктом) другого порядку першого типу, базовою множиною для якої, у даному випадку, є гетерогенна нечітка множина [6].

Нехай $\tilde{R}_x$ – нечіткий кластер, отриманий на основі нечіткого відношення схожості $\tilde{R}$:

$$\tilde{R}_x = \left\{(y, \mu_{\tilde{R}_x}(y)) \mid \mu_{\tilde{R}_x}(y) = f_{\tilde{R}}(x, y), y \in X\right\}, \quad x \in X.$$

Означення 1. Ядром рівня α нечіткого $\tilde{R}_x$ -кластера, породженого елементом $x \in X$, назвемо чітку множину

$$Ker_{\alpha} \tilde{R}_x = \left\{y \in Supp \tilde{R}_x \mid \mu_{\tilde{R}_x}(y) > 1 - \alpha\right\}, \quad 0 < \alpha < 0,5.$$

Неважко показати, що усі елементи, які належать ядру $Ker_{\alpha} \tilde{R}_x$ рівня α певного $\tilde{R}_x$ -кластера схожі між собою, тобто, якщо $y, z \in Ker_{\alpha} \tilde{R}_x$, то $f_{\tilde{R}}(y, z) > 0$.

Позначимо як I_x кількість елементів, з яких складається ядро $Ker_{\alpha} \tilde{R}_x$ рівня α нечіткого кластера $\tilde{R}_x$.

Нехай $0 < \alpha < 0,5$.

Означення 2. Нечітку множину $\tilde{S}_x \subset X$ назвемо нечітким сегментом або нечітким $\tilde{S}_x$ -кластером рівня α ($\tilde{S}_x$ -кластером), якщо

$$\tilde{S}_x = \bigcup_{j=1}^{I_x} \tilde{C}_j, \quad x \in X,$$

де $\tilde{C}_j$ – нечіткий кластер з ядром рівня α , породжений j -м елементом ядра $Ker_{\alpha} \tilde{R}_x$, а символ $\bigcup$ відповідає нечіткому оператору $\max$.

Отже, маємо: $\forall x \in X \quad Ker \tilde{S}_x = \bigcup_{j=1}^{I_x} Ker \tilde{C}_j$. Вочевидь, що усі

елементи, які належать ядру певного сегмента $\tilde{S}_x$, схожі між собою.

Використовуючи формальне означення ядра рівня α нечіткого $\tilde{R}_x$ -кластера значення функції належності елементів $y \in X$ нечіткому $\tilde{S}_x$ -кластеру обчислюємо за формулою

$$\mu_{\tilde{S}_x}(y) = \begin{cases} 1, & y \in Ker_{\alpha} \tilde{R}_x, \\ \max_y \left\{ \mu_{\tilde{C}_j}(y) \mid j = 1, \dots, I_x \right\}, & 0 < \mu_{\tilde{C}_j}(y) \leq 1 - \alpha, j = 1, \dots, I_x. \end{cases}$$

Нечіткий сегмент $\tilde{S}_x$ є нечіткою комбінаторною конфігурацією першого порядку першого типу [6], базовою множиною для якого є нечітка множина усіх $\tilde{R}_x$ -кластерів, функції належності яких вимірюються за абсолютною шкалою.

Позначимо Θ_X – множину нечітких $\tilde{S}_x$ -кластерів для заданого α ($0 < \alpha < 0,5$); нехай Ω_Θ – комбінаторний простір комбінацій усіх можливих підмножин множини Θ_X ; F – критерій оптимізації.

Задачу сегментування множини X сформулюємо так: знайти елемент $\xi^* \in \Omega_\Theta$, такий, що

$$\xi^* = \max_{\xi \in D \subseteq \Omega_\Theta} F(\xi),$$

де D – допустима область, яка визначається так: $|\xi^*| \geq 2, \forall x, y \in X$, таких, що $x \neq y$, виконується умова $Ker \tilde{S}_x \cap Ker \tilde{S}_y = \emptyset$.

Як критерій оптимізації F вибираємо потужність об'єднання ядер $\tilde{S}_x$ -кластерів $\sum_{\tilde{S}_x \in \xi} |Ker \tilde{S}_x|$.

В результаті розв'язання задачі отримаємо оптимальне за критерієм F сегментування множини X за сукупністю нечітких $\tilde{S}_x$ -кластерів, ядра яких взаємно не перетинаються.

Вибір цільового сегменту з ξ^* проводимо, враховуючи обмеження і можливості певної компанії чи фірми, за максимумом одного із критеріїв:

$$\begin{aligned} &|Ker \tilde{S}_x|, \tilde{S}_x \in \xi^*; \\ &|\tilde{S}_x| = \sum_{y \in \tilde{S}_x} \mu_{\tilde{S}_x}(y), \tilde{S}_x \in \xi^*; \end{aligned}$$

прибуток, очікуваний від обслуговування цільового сегмента.

Висновок. Запропонована нечітка модель сегментів ураховує як якісні, так і кількісні характеристики споживачів на ринку послуг. Адекватність нечіткого сегментування забезпечується інваріантністю відношення схожості, яке обчислюється на основі коефіцієнта лінгвістичної кореляції. Визначення поняття сегмента, як об'єднання нечітких кластерів, у яких всі елементи ядра схожі між собою, дозволяє забезпечити змістовну інтерпретацію сегментів та отриманого результату розв'язування задачі сегментування.

Література

1. Cavaliere, Luigi PL et al. (2024). Leveraging Distributed Systems for Improved Market Intelligence and Customer Segmentation. *Meta Heuristic Algorithms for Advanced Distributed Systems*, 305–319. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/9781394188093.ch18>
2. Mechery, S., Preethi, N. (2022). An Intelligent Recommendation System Using Market Segmentation. In: Iyer, B., Crick, T., Peng, SL. (eds) *Applied Computational Technologies. ICCET. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 303, Springer, Singapore. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2719-5_44
3. Luce, R., Krantz, D., Suppes, P., and Tversky, A. (2007). *Foundations of Measurement: vol. III*. New York: Dover Publications, Inc.
4. Riasna, I.I., Senko, I.O., Senko, O.E. (2022). Nechitkii pidhid do modeluvanna ta rozv'azuvanna zadach uporadkuvanna ta viboru. *Visnik KNTU*, 3(82), 74–82, [In Ukrainian].
5. Hulianytskyi, L., Riasna, I. (2021). On Fuzzy Similarity Relations for Heterogeneous Fuzzy Sets. II International Scientific Symposium «Intelligent Solutions» IntSol-2021, September 28–30, 2021, Kyiv-Uzhhorod, Ukraine IntSol, 48–59. Retrieved from: https://ceur-ws.org/Vol-3018/Paper_5.pdf
6. Hulianytskyi, L.F., Riasna, I.I. (2016). Do formalizachii zadach kombinatornoi optimizachii na nechitkih mnozhinah. *Teoria optimal'nih risen*, 15, 17–25, [In Ukrainian].

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ГРИ НА РЕГУЛЯРНОМУ ГРАФІ

Марина Семенюта, Ірина Філімоніхіна

Центральноукраїнський національний технічний університет

ON MODELING A GAME ON A REGULAR GRAPH

Marina Semeniuta, Iryna Filimonikhina

**Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi,
Ukraine**

Abstract. The paper considers a two-player game that simulates the process of vertex-magic total labeling of a regular graph. An algorithm for simulating the game is proposed. An example of its implementation for a specific graph is provided.

Вважатимемо, що $G = (V, E)$ є звичайним зв'язним (p, q) -графом, тобто він скінчений, неорієнтований, не містять кратних ребер та петель і $|V| = p$, $|E| = p$. Розглянемо бієктивну функцію $g: V(G) \cup E(G) \rightarrow \{1, 2, \dots, p + q\}$. Позначимо $w_t(u) = g(u) + \sum_{v \in N(u)} g(u, v)$ вагу вершини $u \in V(G)$, де $(u, v) \in E(G)$, $N(u)$ – множина суміжності u . Якщо всі ваги вершин графа G приймають однакові значення рівні k , то функцію g називають *вершинно-магічною тотальною розміткою* графа G , граф G – *вершинно-магічним тотальним*, а k – *магічною сумою* або *магічною сталою*. Це поняття вперше введено в роботі [1]. Детально з вершинно-магічними тотальними графами можна ознайомитися в книзі [2]. Цю розмітку Е. Будро, Б. Хартнелл, К. Шмайссер і Дж. Уайтлі у 2004 році застосували для обрання оптимальної стратегії в грі на двох гравців, що відбувається на заданому (p, q) -графі [3, 4]. Гравці по черзі призначають невикористану мітку з множини $\{1, 2, \dots, p + q\}$ для незадіяних вершини або ребра. Початкова вершина обирається жеребкуванням. Для заданої вершини x , нехай $S(x)$ – множина, що складається з вершини x і всіх ребер, інцидентних x . Якщо не всім елементам з $S(x)$ були присвоєні мітки, то суму відомих міток називають частковою вагою x . Після того, як для всіх елементів з $S(x)$ визначені мітки, за вагу вершини x приймається число k , що дорівнює сумі відповідних міток, і ця сума повинна бути сталою для кожної вершини графа G . В даній грі це число дорівнює вазі тієї вершини x , для якої знайдені всі мітки з $S(x)$ першими. Для чіткого розуміння суті гри доцільно сформулювати послідовність дій, яку виконують гравці під час розмітки графа. Далі подано алгоритм, що моделює хід гри на регулярному графі, враховуючи вибір гравців, чергування ходів, призначення міток, а також умови перевірки завершення гри та визначення переможця.

Алгоритм. «МОДЕЛЮВАННЯ ГРИ НА РЕГУЛЯРНОМУ ГРАФІ З ВЕРШИННО-МАГІЧНОЮ ТОТАЛЬНОЮ РОЗМІТКОЮ»

Вхідні дані: $n \in \mathbb{N}$ – кількість вершин; $d \in \mathbb{N}$ – степінь регулярного графа, $d < n$, $nd \equiv 0 \pmod{2}$.

Вихідні дані: послідовність ходів гри, мітки на вершинах та ребрах;

Результат: чи була дотримана умова магічності.

Крок 1. Перевірка вхідних даних:

якщо $d \geq n$ або nd непарне, припинити роботу з повідомленням про помилку, інакше перейти до кроку 2.

Крок 2. Генерація графа:

згенерувати випадковий d -регулярний неорієнтований граф $G = (V, E)$.

Крок 3. Підготовка множини міток:

визначити кількість міток: $|V|+|E|$;
побудувати список $g=\{1, 2, \dots, |V|+|E|\}$, перемішати випадковим чином.

Крок 4. Ініціалізація: нехай $player \in \{1,2\}$, початково – гравець 1;
ініціалізувати порожні словники: $vertex_labels, edge_labels$.

Крок 5. Основний цикл гри:

повторювати поки $g \neq \emptyset$ та немає переможця.

5.1. Вийняти наступну мітку ℓ зі списку g .

5.2. Визначити множину непозначених вершин $V' \subseteq V$, ребер $E' \subseteq E$.

5.3. Випадковим чином вибрати: вершину з V' або ребро з E' , і призначити мітку ℓ .

5.4. Для кожної вершини $v \in V$, яка має призначену мітку та всі інцидентні ребра розмічені: обчислити вагу вершини:

$$w(v) = label(v) + \sum_{u \in N(v)} label(uv).$$

Якщо магічна стала ще не встановлена – встановити $k:=w(v)$.

Якщо $w(v) \neq k$, то програє поточний гравець.

5.5. Перейти до наступного гравця.

Крок 6. Завершення гри:

якщо мітки закінчилися або всі елементи розмічені, та не виявлено порушення – гра завершується без переможця.

Інакше виводиться переможець та магічна стала.

Обґрунтування алгоритму

Нехай гра відбувається на d -регулярном графі $G = (V, E)$ за вище описаним алгоритмом. Вершина $v \in V$ задовольняє умові магічності, так як її вага обчислюється за формулою

$$w(v) = g(v) + \sum_{u \in N(v)} g(u, v) = k,$$

де $g(v)$ – мітка вершини $v \in V$, $g(u, v)$ – мітка ребра $(u, v) \in E$, k – магічна стала. Після першої вершини, яка отримує мітки разом з інцидентними їй ребрами, фіксується магічна стала k . Інваріантом гри є «усі розмічені вершини разом з інцидентними ребрами мають вагу k ». Після кожного ходу перевіряється інваріант кожної вершини. Стратегія гравців така: при розмітці вершини або ребра перевіряється, чи призведе це до неузгодженості з магічною сталою, і гравець уникає розмітки, яка порушить інваріант. Тому жодна вага нової повністю

розміченої вершини не відрізнятиметься від k , тобто магічна стала зберігається. В іншому випадку гра завершується по факту першого порушення – що і є критерієм поразки.

Приклад. Здійснимо гру на d -регулярному графі $G = (V, E)$ за вище наведеним алгоритмом, який реалізовано в середовище Python. Для значень параметрів $|V| = 10$, $d = 5$ і отримали:

Ходи гри:

('Гравець 1', 'ребро (1, 6)', 18)
('Гравець 2', 'ребро (4, 10)', 10)
('Гравець 1', 'ребро (4, 8)', 26)
('Гравець 2', 'вершина 4', 32)
('Гравець 1', 'вершина 7', 20)
('Гравець 2', 'ребро (6, 10)', 29)
('Гравець 1', 'ребро (5, 10)', 34)
('Гравець 2', 'ребро (2, 4)', 15)
('Гравець 1', 'ребро (3, 6)', 6)
('Гравець 2', 'ребро (2, 7)', 3)
('Гравець 1', 'ребро (2, 3)', 23)
('Гравець 2', 'ребро (9, 10)', 7)
('Гравець 1', 'ребро (2, 5)', 5)
('Гравець 2', 'вершина 2', 8)
('Гравець 1', 'ребро (5, 8)', 13)
('Гравець 2', 'вершина 10', 16)
('Гравець 1', 'ребро (1, 2)', 11)
('Гравець 2', 'вершина 8', 35)
('Гравець 1', 'ребро (5, 7)', 1)
('Гравець 2', 'ребро (6, 9)', 31)
('Гравець 1', 'вершина 1', 19)
('Гравець 2', 'вершина 5', 22)
('Гравець 1', 'ребро (6, 8)', 33)
('Гравець 2', 'вершина 6', 27)

Переможець: Гравець 1

Магічна стала: 65

На рис. 1 представлено результат гри у вигляді розмітки графа.

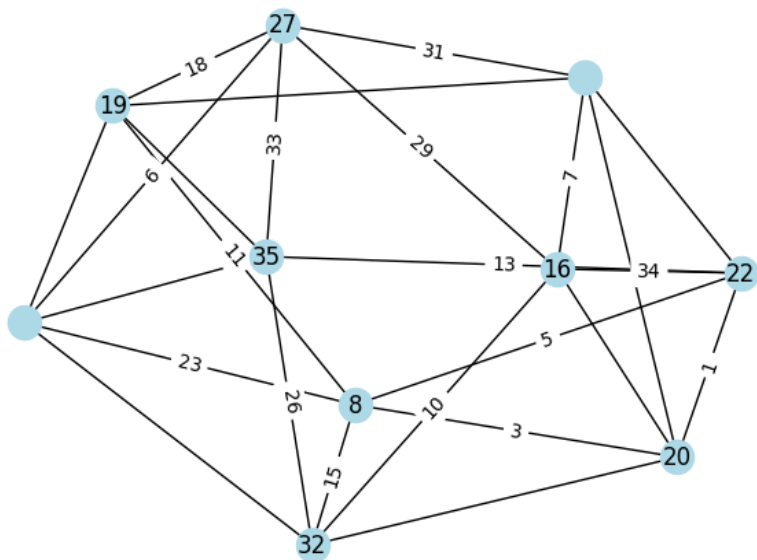


Рис. 1 Регулярний граф гри

Запропонований алгоритм легко адаптується до довільного неорієнтованого графа, оскільки не використовує жодних специфічних властивостей регулярності, а оперує лише з множинами вершин і ребер та відношенням інцидентності.

Література

1. MacDougall J. A., Miller M., Wallis Slamin W. D. Vertex-Magic Total Labelings of Graphs. *Utilitas Math.* 2002. V. 61. P. 3-21.
2. Marr A.M., Wallis W.D. Magic Graphs, Birkhäuser, New York, 2013. – 186 p.
3. Boudreau E. , Hartnell B., Schmeisser K., Whiteley J. A game based on vertex-magic total labelings. *Australasian journal of combinatorics.* Volume 29 (2004), P. 67–73
4. Семенюта М.Ф., Шульгін В.А. Приклади практичних реалізацій магічних і антимагічних типів розміток. Комбінаторні конфігурації та їх застосування: матеріали X Міжнар. наук.-практ. семінару,

**ВИКОРИСТАННЯ СОЛВЕРА BARON ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ
ОПТИМАЛЬНОЇ УПАКОВКИ НЕРІВНИХ КРУГІВ У КВАДРАТ**

Тиводар С., Стецюк П.І.

*Ужгородський національний університет
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України*

**USING THE BARON SOLVER FOR FINDING OPTIMAL
PACKING OF UNEQUAL CIRCLES IN A SQUARE**

TYVODAR S., STETSIUK P.I.

UZHGOROD NATIONAL UNIVERSITY

*V.M. GLUSHKOV INSTITUTE OF CYBERNETICS OF THE NATIONAL
ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE*

***Abstract.** The paper considers a quadratic extremal problem of packing a unequal circles into a minimum area square. The influence of additional linear constraints to speed up the BARON solver time for solving the packing problem with a small number of circles is studied. Additional constraints ensure that the largest circle is placed in the lower left quadrant of the square. Computational experiments are performed for five benchmark instances from website <https://www.packomania.com/> with the number of circles from five to nine. The runtime of the problems is reduced several times.*

У статті [1] досліджено вплив додаткових лінійних обмежень на прискорення часу розв'язання квадратичної екстремальної задачі пакування невеликої кількості нерівних кіл у зовнішнє коло мінімального радіуса за допомогою солвера BARON [2,3]. Обчислювальні експерименти проводились для тестових прикладів, які вільно доступні на веб-сайті <https://www.packomania.com/> (**packomania**) [4]. Кількість нерівних кіл у прикладах змінювалася від п'яти до десяти. Аналогічне дослідження опишемо нижче для задачі пакування невеликої кількості нерівних кругів у квадрат найменшої площі (мінімальна довжина сторони квадрата).

Нехай задано сімейство m кругів C_i з радіусами r_i , $i = 1, \dots, m$, які потрібно розмістити всередині квадрата K_0 з центром в точці $(0, 0)$ та

змінною довжиною сторони a . Будемо вважати, що всі радіуси кругів є різними. Оптимальною упаковкою сімейства кругів в квадрат K_0 називають таку їх упаковку, для якої a^* – довжина сторони квадрата K_0 є мінімальною за умов, що круги C_i , $i = 1, \dots, m$ знаходяться всередині квадрата K_0 та попарно не перетинаються між собою (можуть торкатися один одного).

Якщо позначити (x_i, y_i) – невідомий центр круга C_i , $i = 1, \dots, m$, то задачі оптимальної упаковки сімейства кругів в квадрат K_0 відповідає багатоекстремальна квадратична задача, яка має такий вигляд:

$$a^* = \min_{a, x, y} a \quad (1)$$

за обмежень

$$-\frac{a}{2} + r_i \leq x_i \leq \frac{a}{2} - r_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

$$-\frac{a}{2} + r_i \leq y_i \leq \frac{a}{2} - r_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (3)$$

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \geq (r_i + r_j)^2, \quad 1 \leq i < j \leq m, \quad (4)$$

де $x = (x_1, \dots, x_m)$, $y = (y_1, \dots, y_m)$.

Задача (1) – (4) є багатоекстремальною задачею нелінійного програмування. Тут лінійна цільова функція (1) пов'язана з мінімізацією a – довжини сторони квадрата K_0 . Лінійні обмеження (2) та (3) означають, що кожний круг C_i , $i = 1, \dots, m$, належить квадрату K_0 . Квадратичні обмеження (4) гарантують, що ніякі два круги із сімейства кругів C_i , $i = 1, \dots, m$ не перетинаються між собою.

В таблиці 1 наведено результати розв'язання задачі (1) – (4) за допомогою солвера BARON для п'яти тестових прикладів $m \in \{5, 6, 7, 8, 9\}$ з **packomania**, де радіуси кругів C_i , $i = 1, \dots, m$ є рівними $r_i = i$. Розрахунки проводилися на NEOS-сервері [5], а на розв'язання однієї задачі відводився граничний час в 7200 секунд.

В таблиці використовуються такі позначення: N_{itm} – кількість ітерацій солвера BARON, $time$ – усереднений час (в секундах) для розв'язання тестової задачі, a_{low} – нижня границя на довжину сторони,

a_{up} – верхня границя на довжину сторони, $a_{packomania}$ – найменша довжина сторони квадрата K_0 з **packomania**. Усереднений час визначався як середній час за 10 запусків солвера BARON.

Таблиця 1
BARON – отримані розв’язки задачі (1) – (4) для п’яти тестових прикладів

m	N_{in}	$time$	a_{low}	a_{up}	$a_{packomania}$
5	111	0.61	15.60328	15.60328	15.60328
6	243	2.55	19.42290	19.42290	19.42290
7	6623	35.80	23.81888	23.81888	23.81888
8	83482	540.71	29.10528	29.10528	29.10528
9	576359	7200.00	30.36492	33.75431	33.75431

З таблиці 1 видно, що за 7200 секунд BARON не знайшов глобальний розв’язок для тестового прикладу $m = 9$. Верхня границя для a^* (**33.75431**) є більшою за нижню границю (**30.36492**) і розрив між ними складає більше 10%.

Для тестових прикладів $m \in \{6, 7, 8\}$ на рисунку 1 наведені розв’язки, знайдені солвером BARON, а на рисунку 2 наведені розв’язки з **packomania**.

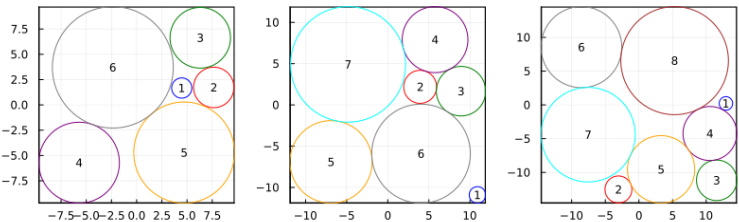


Рис. 1 – BARON: розв’язки задачі (1) –(4) для $m \in \{6, 7, 8\}$

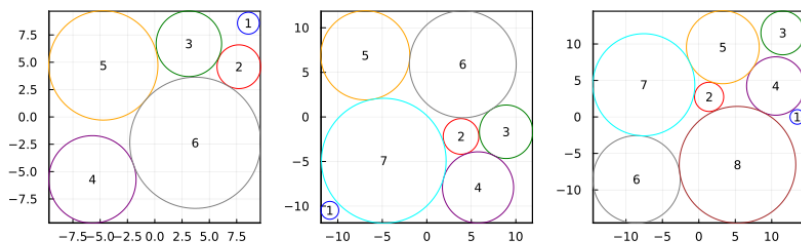


Рис. 2 – *packomania*: розв'язки задачі (1) – (4) для $m \in \{6, 7, 8\}$

Із рисунків 1 та 2 видно, що розв'язки задачі (1)–(4), знайдені солвером BARON, та розв'язки задачі (1)–(4) з **packomania** суттєво відрізняються розміщенням центрів кругів C_i , $i = 1, \dots, m$. Так, центри найбільшого круга для оптимальних квадратів K_0 знаходяться: у верхньому лівому квадранті (рис. 1) та у нижньому правому квадранті (рис. 2) при $m = 6$, у верхньому лівому квадранті (рис. 1) та у нижньому лівому квадранті (рис. 2) при $m = 7$, у верхньому правому квадранті (рис. 1) та у правому нижньому квадранті (рис. 2) при $m = 8$.

Це означає, що якщо кожен зі знайдених розв'язків повернути на 90, 180 та 270 градусів відносно фіксованого центра квадрата, то отримаємо ще по три додаткові розв'язки відповідної задачі. Щоб уникнути цих додаткових розв'язків, достатньо до задачі (1) – (4) додати лінійні нерівності

$$x_m \leq 0, \quad y_m \leq 0, \quad (5)$$

які гарантують що центр найбільшого круга буде знаходитися в лівому нижньому квадранті. Це дозволить прискорити роботу солвера BARON для знаходження оптимальної упаковки нерівних кругів у квадрат.

Про це свідчать результати щодо розв'язання задачі (1) – (5) для тестових прикладів, які наведені в таблиці 2. В таблиці використовуються такі ж позначення, як і в таблиці 1, окрім останньої колонки, де наведено a^* – оптимальне значення цільової функції (1). Воно визначено з точністю до п'яти цифр після коми, оскільки для отриманих солвером BARON розв'язків співпадають a_{low} – нижні

границі та a_{up} – верхні границі на довжину сторони мінімального за площею квадрата. В колонці «*time*» наведено усереднений час (в секундах), який визначався як середній час за 10 запусків солвера BARON для розв’язання відповідної тестової задачі (1) – (5).

Таблиця 2

BARON – отримані розв’язки задачі (1) – (5) для п’яти тестових прикладів

m	N_{im}	$time$	a_{low}	a_{up}	a^*
5	1	0.16	15.60328	15.60328	15.60328
6	11	0.73	19.42290	19.42290	19.42290
7	723	5.62	23.81888	23.81888	23.81888
8	32403	164.09	29.10528	29.10528	29.10528
9	498008	4379.92	33.75431	33.75431	33.75431

З таблиці 2 видно, що солвер BARON успішно розв’язав задачі (1) – (5) для всіх тестових прикладів, затративши значно менший час, ніж для розв’язання відповідних задач (1) – (4). Для перших чотирьох тестових прикладів коефіцієнти покращення за часом такі:

$$q_5 = \frac{0.61}{0.16} \approx 3.8125, \text{ якщо } m = 5, \quad q_6 = \frac{2.55}{0.73} \approx 3.4931, \text{ якщо } m = 6,$$

$$q_7 = \frac{35.80}{5.62} \approx 6.3701, \text{ якщо } m = 7 \text{ та } q_8 = \frac{540.71}{164.09} \approx 3.2952, \text{ якщо } m = 8.$$

Для п’ятого тестового прикладу з $m = 9$, для якого задача (1) – (4) не була розв’язана за 7200 секунд, задача (1) – (5) розв’язана за 4800 секунд. Зауважимо, що для розв’язання задач (1)-(5) потрібно було значно меншу кількість ітерацій, ніж для розв’язання задач (1)-(4) (див. колонки N_{im} в таблицях 1 та 2).

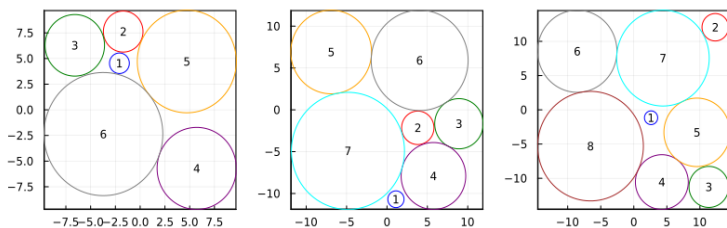


Рис. 3 – *BARON*: розв'язки задачі (1) –(5) для $m \in \{6, 7, 8\}$

Для тестових прикладів $m \in \{6, 7, 8\}$ на рисунку 3 наведені розв'язки задачі (1) – (5), які знайдені солвером *BARON*. Із рисунка 3 видно, що для всіх тестових прикладів центри найбільших кругів знаходяться в нижньому лівому квадранті, що узгоджується з виконанням лінійних обмежень (5).

Література

1. Стецюк П.І., Романова Т.Є., Тиводар С.Р. Використання солвера *BARON* для розв'язання квадратичної задачі оптимальної упаковки нерівних кругів. Матеріали XXVI Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування» (Кропивницький–Запоріжжя–Київ, 13-15 червня 2024 року). Кропивницький: ПП «ЕксклюзивСистем», 2024. С. 179–188.
2. Tawarmalani M., Sahinidis N.V. A polyhedral branch-and-cut approach to global optimization. *Mathematical Programming*. 2005. 103(2). P. 225–249.
3. Sahinidis N.V., *BARON 21.1.13: Global Optimization of Mixed-Integer Nonlinear Programs, User's manual*, 2021.
4. Packomania. <https://www.packomania.com/> (звернення: 28.05.2025)
5. NEOS Solver. <https://neos-server.org/> (accessed: 28.05.2025).

КОМБІНАТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ЇЇ ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ

Надія Тимофієва

Інститут інформаційних технологій НАН України

COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND ITS CHARACTERISTIC FEATURES

Nadija Tymofijeva

Institute of Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine

Abstract. The characteristic features of combinatorial optimization, in which the objective function is defined on a combinatorial set, are described. A method for modeling applied problems within the framework of this theory is presented. According to the argument of the objective function (combinatorial configuration), they are divided into subproblems, due to the special structure of the argument, a situation of uncertainty arises, and some problems of this class are characterized by similarity.

Вступ. Описано комбінаторну оптимізацію та деякі її властивості. Розроблено метод моделювання прикладних задач в рамках цієї теорії. Аргументом цільової функції в них є комбінаторні конфігурації різних типів, які розділяють на прості та комбіновані. Останні при розв'язанні задач вносять ситуацію невизначеності. Прикладні задачі складні за своєю природою і за аргументом цільової функції їх розділяють на підзадачі, для розв'язання яких необхідно розробляти комбіновані алгоритми. За обчисленням цільової функції задачі цього класу розділяють на динамічні та статичні. За аргументом цільової функції встановлено їхню подібність.

Постановка задачі. Розглянуто деякі особливості теорії комбінаторної оптимізації, в якій цільову функцію визначено на множині комбінаторного характеру. Багато прикладних задач зводяться до задач оговореної теорії, тому розроблено метод їхнього моделювання. Встановлено причини виникнення в них ситуації невизначеності, виявлено подібність деяких задач цього класу.

Підхід, що пропонується. Для виявлення характерних особливостей комбінаторної оптимізації проведено аналіз прикладних задач, які зводяться до задач комбінаторної оптимізації, виявлено загальні їхні властивості, для них розроблено математичну постановку, яка враховує властивості широкого класу задач, запропоновано метод їхнього моделювання. За аргументом цільової функції прикладні задачі

розділяють на підзадачі, уведено ознаки, за якими встановлюють їхню подібність.

Про комбінаторну оптимізацію та цілочислове лінійне програмування.

Комбінаторна оптимізація – область математики, предметом якої є дослідження та розв'язання екстремальних задач як на скінченній, так і нескінченній множині комбінаторного характеру. Основна увага в комбінаторній оптимізації приділяється визначенню обчислювальної складності цих задач, розробленню методів та алгоритмів їхнього розв'язання.

Для розробки математичних моделей задач комбінаторної оптимізації часто використовують цілочислове лінійне програмування. Ця задача полягає у знаходженні оптимального значення цільової функції на множині, яка задається системою лінійних рівнянь і нерівностей, причому на змінні накладаються умови цілочисельності. При цьому вважають, що цільова функція залежить від багатьох змінних. В комбінаторній оптимізації цільова функція залежить як від однієї змінної, так і від кількох, якими є комбінаторні конфігурації різних типів, а змінні в моделі цілочислового лінійного програмування є вхідними даними.

Математична модель задачі цілочислового лінійного програмування формулюється в такому вигляді. Знайти екстремум

функції $\sum_{i=1}^n c_i x_i$ при умовах $\sum_{i=1}^n a_{il} x_i = b_l$, $l = \overline{1, m}$, $x_i \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, x_i –

цілі для $i = \overline{1, p}$, $p \leq n$, де c_i, a_{il}, b_l – задані цілі числа, x_i – змінні.

Виходячи з цієї моделі вважають, що цільова функція в комбінаторній оптимізації залежить від багатьох змінних, а x_i є елементами комбінаторних конфігурацій $w = (w_1, \dots, w_n)$, які перемножуються на задані числа c_i, a_{il} . Але це неможливо, оскільки $w_i \in w$ можуть мати будь-яку природу. Змінні x_i не є елементами w , а модель цілочислового лінійного програмування не відображає суті задач комбінаторної оптимізації. Цілочислове лінійне програмування розроблялося для економічних задач, для яких математична постановка формулюється так: задано одну множину A , елементи $a_i \in A$ якої не мають між собою зв'язків. Натомість кожен елемент $a_i \in A$, $i \in \{1, \dots, n\}$, характеризується певною властивістю (вагою) x_i . Аргументом цільової функції у них, як правило, є вибірки (сполучення, розміщення), а вхідні

дані – послідовність значень ваг $x_1, \dots, x_n$ елементів a_i заданої множини A , кількість яких збігається з кількістю елементів у $w = (w_1, \dots, w_n)$. Звідси твердження, що аргументом цільової функції в цих задачах є послідовність вхідних даних $x_1, \dots, x_n$, а не комбінаторна конфігурація. Відповідно вважають, що цільова функція в задачах комбінаторної оптимізації залежить від багатьох змінних. Послідовність $x_1, \dots, x_n$ є вхідними даними певної задачі, а значення x_i неявно залежить від

комбінаторної конфігурації, тобто вираз $\sum_{i=1}^n c_i x_i$ запишемо у такому

вигляді: $F(w) = \sum_{i=1}^n c_i x_i(w)$. Тоді постає проблема визначення цієї

залежності в задачах комбінаторної оптимізації. Для цього необхідно розробляти постановки цих задач з урахуванням їхньої комбінаторної природи.

У 70-х роках минулого століття в математичній літературі переважно вченими з Радянського Союзу формальні постановки задач комбінаторної оптимізації розроблялися з урахуванням їхньої комбінаторної природи. Зокрема, в Інституті кібернетики цими проблемами займалися І.В. Сергієнко та його учні [1]. Ними розроблено математичні моделі прикладних задач, аргументом цільової функції в яких визначено комбінаторні конфігурації різних типів.

Узагальнена постановка задачі комбінаторної оптимізації.
Наведемо узагальнену постановку задачі комбінаторної оптимізації [2]. Задачі цього класу, як правило, задаються однією або кількома множинами, наприклад A та B , елементи яких мають будь-яку природу. Назвемо ці множини *базовими*. Наявні два типи задач. В *першому* типі кожному з цих множин подамо у вигляді графа, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число $c_{it} \in R$, яке називають вагою ребра (R – множина дійсних чисел), $i \in \{1, \dots, n\}$, $t \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$, n – кількість елементів множини A , $\tilde{n}$ – кількість елементів множини B . Покладемо, що $n = \tilde{n}$. Між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини c_{it} назвемо *вхідними* даними та задамо їх матрицями. В *другому* типі задач між елементами заданої множини зв'язків не існує, а вагами є числа $v_j \in R$, $j \in \{1, \dots, n\}$, яким у відповідність поставлено деякі властивості цих елементів, числові

значення яких задаються скінченними послідовностями, що також є вхідними даними. Ці величини визначають значення цільової функції.

Для обох типів задач із елементів однієї або кількох із заданих множин, наприклад $a_l \in A$, $l \in \{1, \dots, n\}$, утворюється комбінаторна множина W – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах w комбінаторної множини W вводиться цільова функція $F(w)$. Необхідно знайти елемент множини W , для якого $F(w)$ набуває оптимального значення при виконанні заданих обмежень.

Змодельємо вхідні дані функцією натурального аргументу. Подамо елементи h наддіагоналей симетричної комбінаторної матриці $Q(w^k)$ комбінаторною функцією $\beta(f(j), w^k)_1^m$, а елементи h наддіагоналей симетричної матриці C – функцією натурального аргументу $\varphi(j)_1^m = (\varphi(1), \dots, \varphi(m))$, де $m = \frac{n(n-1)}{2}$ – кількість елементів h наддіагоналей матриць C та $Q(w^k)$, $h = \overline{1, n-1}$. Верхній індекс k ($k \in \{1, \dots, q\}$) у w^k позначає порядковий номер w^k у W , q – кількість w^k у W . Якщо матриці $Q(w^k)$ та C – несиметричні, то $\beta(f(j), w^k)_1^m$ та $\varphi(j)_1^m$ містять усі їхні елементи, а $m = n^2$ (або $m = n \tilde{n}$). Для задач, які розв'язуються на перестановках цільова функція набуває вигляду

$$F(w^k) = \sum_{j=1}^m \beta_j(f(j), w^k) \varphi(j).$$

Представлення вхідних даних функціями натурального аргументу дозволило розробити метод структурно-алфавітного пошуку для розв'язання задач комбінаторної оптимізації, який ґрунтується на розпізнаванні структури вхідної інформації, володіє величезною швидкістю і дозволяє знаходити глобальний розв'язок або наближений до нього в реальному часі.

Таке представлення вхідних даних дозволяє знаходити підкласи розв'язних задач із різних класів задач комбінаторної оптимізації: розміщення одногабаритних модулів, задачі комівояжера, задачі про призначення, задачі кластеризації.

Метод моделювання прикладних задач в рамках теорії комбінаторної оптимізації.

За способом обчислення цільової функції виділимо задачі, в яких для певного варіанту розв'язку її значення обчислюється одночасно. Такі задачі назвемо статичними. Задачі, в яких в процесі їхнього розв'язання генерується поточна інформація, за якою оцінюється результат, а пошук оптимального розв'язку проводиться поетапно з обчисленням часткових сум цільової функції, назвемо динамічними.

Для моделювання прикладних задач в рамках теорії комбінаторної оптимізації необхідно:

- а) за способом обчислення цільової функції визначити вид задачі (статична або динамічна);
- б) визначити базові множини, якими задається певна задача;
- в) за вхідними даними визначити її тип;
- г) визначити аргумент цільової функції (комбінаторну конфігурацію);
- д) змоделювати цільову функцію.

Уточнимо такі поняття як критерій та цільова функція.

Критерій – ознаки або властивості, які характеризують певний об'єкт або зв'язки між об'єктами та є вхідними даними.

Цільова функція – вираз, який формулюється на основі заданих критеріїв з урахуванням особливостей задачі, за яким обчислюється та оцінюється результат її розв'язку.

Як правило, цільову функцію ототожнюють з критеріями, а за її аргумент приймають вхідні дані. Але для одних і тих же критеріїв цільову функцію можна змоделювати по-різному, тобто оцінку проводять за різними виразами та отримують різний результат. До того ж вона може залежати як від однієї змінної так і від багатьох. За цією ознакою задачі комбінаторної оптимізації розділяються на підзадачі. В цьому разі для їхнього розв'язання розробляють гібридні алгоритми.

Невизначеність в комбінаторній оптимізації, яка пов'язана з аргументом цільової функції.

Ситуацію невизначеності, яка виникає в задачах комбінаторної оптимізації, пов'язують з неповною вхідною та поточною інформацією. Але зазначена ситуація в задачах цього класу виникає і внаслідок особливої структури аргументу цільової функції, яку в літературі не розглядають. Закономірність зміни значень цільової функції в задачах комбінаторної оптимізації залежить від упорядкування комбінаторних конфігурацій (аргументу) $w \in W$. На підмножині, яка складається з

ізоморфних комбінаторних конфігурацій W_η , цільова функція $F(w^k)$ змінюється так, як і на множині перестановок. Можна довести, що на множині перестановок і на підмножині ізоморфних комбінаторних конфігурацій ситуація невизначеності зводиться до мінімуму. Але на множині W , яка складається з підмножин $W_\eta \subset W$, закономірність зміни значень функції $F(w^k)$ однакова незалежно від вхідних даних, а результат розв'язку задачі – неоднозначний. Тобто, виникає ситуація невизначеності, що пов'язана із структурою аргументу цільової функції.

Прикладні задачі, які розділяють на підкласи. Цільова функція в задачах комбінаторної оптимізації може залежати від кількох змінних, якими є комбінаторні конфігурації різних типів. Такі задачі досить природно розділяють на кілька підзадач, для розв'язання кожної з яких розробляють незалежні алгоритми, що працюють як вбудовані процедури в ітераційному режимі. Тобто, задачі комбінаторної оптимізації, цільова функція в яких залежить від кількох змінних, якими є комбінаторні конфігурації різних типів, потребують для свого розв'язку розроблення гібридних (комбінованих) алгоритмів.

Приклад. Розглянемо задачу типу задачі комівояжера, яка формулюється так. Задано n міст, кожне з яких має один вхід і один вихід, координати яких не збігаються. Відстань між двома містами має чотири значення. Всередині міст відстань не урахується. Необхідно знайти найкоротший маршрут, який проходить через усі міста один раз і повертається в початковий. Ця задача розділяється на дві підзадачі, аргументом цільової функції однієї є перестановка, а другої – бінарна послідовність.

Задача розміщення різногабаритних модулів зводиться до одногабаритної шляхом розділення її на задачу компоновки і задачу розміщення одногабаритних модулів, а цільова функція в ній залежить від розбиття n -елементної множини на підмножини і перестановки.

Подібність задач комбінаторної оптимізації. В комбінаторній оптимізації можна навести багато прикладів, коли задачі з різних класів розв'язуються за однією і тією ж обчислювальною схемою. Ця властивість в літературі достатньою мірою не висвітлена, хоча існуючі універсальні методи орієнтовані на розв'язання різноманітних таких задач. Системний аналіз задач комбінаторної оптимізації з використанням теорії комбінаторної оптимізації показує, що деякі з них, які відносяться до різних класів, розділяються на підзадачі, які розв'язують за однією обчислювальною схемою або модифікацією

одного і того ж алгоритму. Наприклад, задача клінічної діагностики та розпізнавання мовлення подібні за аргументом цільової функції та розділяються на три подібні підзадачі. Аргументом цільової функції в першій підзадачі є розбиття n -елементної множини на підмножини, в другій – розміщення без повторень, а в третій – сполучення без повторень. Подібність задач комбінаторної оптимізації пояснює природу універсальності методів та алгоритмів їхнього розв’язання.

Висновок. Запропонована математична постановка описує широкий клас задач комбінаторної оптимізації та враховує їхні комбінаторні властивості. Представлення вхідних даних функціями натурального аргументу дозволяє виділяти підкласи розв’язних задач, вивчати структури вхідної інформації та аналітично знаходити глобальні розв’язки. Їх використовують для доведення збіжності різних алгоритмів. Підклас розв’язних задач лежить в основі методу структурно-алфавітного пошуку розв’язання задач комбінаторної оптимізації, який ґрунтується на розпізнаванні структури вхідної інформації та дозволяє знаходити глобальний розв’язок або наближений до нього. З використанням аргументу цільової функції встановлюють подібність задач комбінаторної оптимізації, за цією ознакою їх розділяють на підзадачі, для розв’язання яких використовують комбіновані алгоритми.

Література

1. Sergienko I. V., Kasphtitzkaja M. F. (1981) Modeli i metodu reshenija na EVM kombinatornux zadath optimizatzii [Models and Methods of the Solution to ECM Combinatorial Optimization Problems]. Kiev. Nauk Dumka, [In Ukrainian].
2. Tymofijeva N.K. (2007) Teoretyko-thyslovi metody rozvjazannja zadath kombinatorno'j optymizatsiji [Theoretical-Numerical Methods Used to Solve Combinatorial Optimization Problems]. Avtoref. dys...dokt. texn. nauk, In-t kibernetiky im. V.M. Glushkova NAN Ukrainy. Kyjiv. [In Ukrainian].

ЕФЕКТИВНІСТЬ ДУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВЧАННЯ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Сергій Щербakov, Дмитро Широкоград
Національний університет «Запорізька політехніка»

EFFECTIVENESS OF THE DUAL EDUCATION SYSTEM FOR HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Serhii Shcherbakov, Dmytro Shyrokorad
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract: This study aimed to develop an optimization model for resource allocation in the dual education-business interaction system to maximize professional training effectiveness according to labor market needs. The research methodology involved expert evaluation with 5 educational representatives, 15 business representatives, and 10 experts conducted from January to December 2024 across ten leading companies including Ukrposhta, Nova Poshta, Rozetka, and Vodafone. The study created a multi-criteria optimization model with target function $F(x) = \max[\sum(\alpha_i \cdot E_i(x) + \beta_i \cdot S_i(x) + \gamma_i \cdot Q_i(x))]$, where weight coefficients were determined as economic efficiency ($\alpha = 0.42$), participant satisfaction ($\beta = 0.31$), and competency compliance ($\gamma = 0.27$). Empirical research of 120 students demonstrated model accuracy with mean absolute percentage error of 11.3%, significantly below the 15% critical threshold. The evaluation revealed stakeholder readiness index of 6.6 points on a 10-point scale with statistically significant differences between sectors. Practical recommendations included implementing balanced resource allocation with 40:60 proportion between educational institutions and business partners, establishing integrated financing mechanisms, and developing differentiated training programs.

Keywords: optimization model, dual education, resource allocation, multi-criteria analysis, professional training, business partnership.

Вступ. Сучасний стан економіки України характеризується високим рівнем динамічності та невизначеності, що вимагає від системи освіти швидкої адаптації до мінливих умов ринку праці. Протягом останніх років спостерігається значний дисбаланс між професійною підготовкою фахівців та реальними потребами ринку праці, що призводить до зростання рівня безробіття серед випускників закладів освіти.

В той же час у 2024 році рівень працевлаштування випускників українських закладів освіти знизився: лише 54,3% молодших

спеціалістів, 48,4% бакалаврів і 57,7% магістрів змогли знайти роботу за спеціальністю протягом першого року після завершення навчання [1]. Одночасно 71% українських компаній у 2024 році повідомили про гостру нестачу кваліфікованих працівників, а 87% роботодавців підвищили заробітні плати, намагаючись зберегти персонал, при цьому 88% відкрили нові вакансії, очікуючи зростання штату у 2025 році [2;3]

Одним із ефективних механізмів подолання цього дисбалансу вважається дуальна система освіти, що передбачає інтеграцію теоретичного навчання у закладах освіти з практичною підготовкою на підприємствах. Впровадження дуальної системи навчання в Україні розпочалося з ухвалення Кабінетом Міністрів Концепції підготовки фахівців за дуальною формою здобуття освіти [4]. Проте, незважаючи на значний потенціал даної системи, її ефективна реалізація стикається з проблемою оптимального розподілу ресурсів для ефективного партнерства між освітніми установами та бізнесом.

Перспективи розвитку дуальної освіти та інноваційні підходи до її впровадження детально проаналізувала [5], яка запропонувала комплексну модель імплементації дуальної освіти в систему вищої освіти. На основі математичного моделювання та аналізу даних автор розробила алгоритм оптимального розподілу навчального навантаження між університетом, виробництвом та самостійною роботою, який дозволить підвищити рівень працевлаштування випускників та знизити витрати на перепідготовку кадрів.

Аналіз наукової літератури демонструє, що, незважаючи на значну кількість досліджень у сфері дуальної освіти, питання оптимізації розподілу ресурсів між освітніми установами та підприємницькими структурами залишається недостатньо вивченим. Існуючі дослідження зосереджуються переважно на організаційних та педагогічних аспектах впровадження дуальної освіти, тоді як математичні моделі оптимізації ресурсного забезпечення цього процесу представлені фрагментарно. Зокрема, відсутні комплексні дослідження, які б враховували динамічну взаємодію різних типів ресурсів (матеріальних, інформаційних, людських) та їх вплив на ефективність дуальної системи в цілому.

Метою даного дослідження є розробка оптимізаційної моделі розподілу матеріальних, інформаційних та людських ресурсів у дуальній системі взаємодії освіти та бізнесу, яка забезпечить максимальну ефективність підготовки фахівців відповідно до потреб ринку праці та стратегічних цілей розвитку економіки України. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити три завдання: 1) визначити критерії оптимальності розподілу ресурсів для забезпечення ефективної взаємодії освітніх установ та підприємств; 2) розробити

математичну формалізацію процесу розподілу ресурсів у дуальній системі з урахуванням інтересів усіх зацікавлених сторін; 3) обґрунтувати методи оптимізації для вирішення задачі розподілу ресурсів у дуальній системі в умовах невизначеності та мінливості зовнішнього середовища.

Виклад основного матеріалу.

В дослідженні, яке тривало з січня по грудень 2024 року, прийняли участь 5 представників освітньої сфери, 15 представників бізнесу та 10 експертів.

Дослідження досягло поставленої мети шляхом розробки оптимізаційної моделі розподілу ресурсів у дуальній системі взаємодії освіти та бізнесу, яка забезпечувала максимальну ефективність підготовки фахівців відповідно до потреб ринку праці. Створена багатокритеріальна модель оптимізації інтегрувала економічні, соціальні та освітні показники для досягнення синергетичного ефекту від співпраці освітніх установ та підприємств.

Математична модель розподілу ресурсів сформована автором дослідження як задача багатокритеріальної оптимізації з цільовою функцією:

$$F(x) = \max[E(\alpha^i \cdot E^i(x) + \beta^i \cdot S^i(x) + \gamma^i \cdot Q^i(x))] \quad (1)$$

де $E_i(x)$ - безрозмірний коефіцієнт економічної ефективності (діапазон 0-10, де 0 - повна неефективність, 10 - максимальна ефективність); $S_i(x)$ - індекс задоволеності учасників процесу (діапазон 0-1, де 0 - повна незадоволеність, 1 - повна задоволеність); $Q_i(x)$ - коефіцієнт відповідності компетентностей вимогам ринку (діапазон значень: від 0 до 1, де 0 - повна невідповідність, 1 - повна відповідність); $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ - нормалізовані вагові коефіцієнти (діапазон 0-1, де сума $\alpha_i + \beta_i + \gamma_i = 1$ для кожного варіанту i).

Змінна x - це величина, що оптимізується:

x - це вектор розподілу ресурсів (матеріальних, інформаційних, людських) між освітніми установами та підприємствами.

А $E(x), S(x), Q(x)$ - це функції, що залежать від цього розподілу ресурсів:

- $E(x)$ - як економічна ефективність змінюється залежно від розподілу ресурсів
- $S(x)$ - як задоволеність учасників залежить від розподілу ресурсів
- $Q(x)$ - як відповідність компетенцій залежить від розподілу ресурсів

Тобто шукаємо **оптимальний розподіл ресурсів** (x), який максимізує зважену суму трьох критеріїв.

Перше завдання виконано через визначення критеріїв оптимальності, де експертним оцінюванням встановлено вагові коефіцієнти: економічна ефективність ($\alpha = 0,42$), задоволеність учасників ($\beta = 0,31$) та відповідність компетенцій ($\gamma = 0,27$). Квадрокритеріальна схема оцінювання виявила загальний індекс готовності стейкхолдерів до співпраці на рівні 6,6 балів за 10-бальною шкалою при статистично значущих відмінностях між освітньою та бізнес-сферами за мотиваційним та ресурсним компонентами.

Друге завдання реалізовано розробкою математичної формалізації процесу як задачі багатокритеріальної оптимізації з лінійною цільовою функцією, параметризованою за результатами емпіричного дослідження 120 здобувачів освіти у десяти провідних компаніях України: Укрпошта, Нова пошта, Rozetka, Епіцентр, Фора, Сільпо, АТБ, UKRSIBBANK, Ощадбанк та Vodafone. Модель продемонструвала високу точність прогнозування з середньою абсолютною відсотковою похибкою 11,3%, що значно нижче критичного порогу 15% для практичного застосування.

Третє завдання вирішено обґрунтуванням методу аналізу оболонки даних для оптимізації розподілу ресурсів в умовах невизначеності. Валідація моделі засвідчила високу узгодженість з експертними оцінками ($r = 0,82$) та стабільність рішень при варіації параметрів, що підтверджувало її надійність для стратегічного планування.

Практичні рекомендації включали впровадження збалансованої дуальної моделі розподілу ресурсів з пропорцією 40:60 між освітніми установами та бізнес-партнерами, створення інтегрованих механізмів фінансування та розробку диференційованих програм підготовки для різних спеціальностей з урахуванням їхніх особливостей адаптації.

Перспективи подальших досліджень охоплювали розширення моделі для врахування динамічних змін ринку праці, інтеграцію цифрових технологій у процес оптимізації та дослідження міжнародного досвіду адаптації дуальних систем до національних умов для підвищення прогностичної здатності моделі.

Обмеження дослідження пов'язані з проведенням в умовах військових дій, що обмежило географію емпіричних досліджень та можливості очного спостереження, а також з відносно невеликою вибіркою експертів та короткостроковим періодом валідації моделі без довгострокового моніторингу результатів.

Результати дослідження створювали наукове підґрунтя для оптимізації взаємодії освіти та бізнесу в Україні, забезпечуючи теоретичну основу для розробки державної політики розвитку дуальної освіти та практичний інструментарій для управління ресурсами в освітньо-бізнес партнерствах.

Таким чином, розроблена оптимізаційна модель розподілу ресурсів забезпечувала науково обґрунтований підхід до максимізації ефективності підготовки фахівців відповідно до потреб ринку праці, враховуючи специфіку різних спеціальностей, гендерні особливості, баланс теоретичної та практичної підготовки.

References

1. Znayshov, V. (2025). Статистичний аналіз працевлаштування випускників ЗВО України. Освіта України, 4(12), 34-42. URL: <https://educationua.org/archives/202504/stat-analysis>
2. Мінфін (2025). Аналітичний звіт "Ринок праці України: тренди, виклики та перспективи розвитку". URL: <https://www.minfin.gov.ua/news/analitika/2025/report>
3. Новини Live (2025). Дослідження ринку праці України: статистика та аналітика. URL: <https://novynylive.com.ua/economics/2025/02/labor-market>
4. КМУ (2018). Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про схвалення Концепції підготовки фахівців за дуальною формою здобуття освіти" від 19 вересня 2018 р. № 660-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/660-2018-p>
5. Siddikova, S. (2025). Proposals for Implementing Dual Education in the Higher Education System. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(3), 205-209. URL: <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/2865>

**СЕКЦІЯ 5. ГРАФИ ЗНАНЬ, ОНТОЛОГІЇ, МАШИННЕ
НАВЧАННЯ, ГРАФОВІ БАЗИ ДАНИХ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ**

**СТВОРЕННЯ ОНТОЛОГІЇ ФЕНОТИПІЧНИХ ОЗНАК
СОНЯШНИКА HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED & HEAD):
ЦИФРОВІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАСІННЯ**

Станіслав Ведмедєв

Національний університет «Запорізька політехніка»

**DEVELOPMENT OF AN ONTOLOGY OF SUNFLOWER
PHENOTYPIC TRAITS HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED &
HEAD): DIGITIZATION OF SEED CHARACTERISTICS**

Stanyslav Vedmedev

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. This study presents the development of the HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED & HEAD) ontology, a result of collaboration between the Institute of Oilseed Crops of NAAS of Ukraine and Zaporizhzhia Polytechnic. Emphasis was placed on quantitative phenotypic traits, with a focus on precise measurement of seed area and size using digital image analysis. A dataset of 3,000+ seed images from 250 sunflower lines was collected to capture morphological variability. Standardized imaging was performed with a stationary photo system in the RGB spectrum, minimizing visual distortions. A custom segmentation algorithm was developed to detect seed contours and extract color and size parameters automatically. This approach enables accurate, automated phenotypic analysis, supporting breeding and agricultural research. The resulting database provides a valuable digital resource for phenotypic analysis and supports ongoing sunflower breeding programs.

У співпраці між фахівцями Інституту олійних культур НААН України та Національним університетом «Запорізька політехніка» було створено онтологію фенотипічних ознак соняшника HELIANTHUS PHENOTYPE (SEED & HEAD) [1]. При розробці цієї онтології фахівцями Інституту олійних культур було визначено стратегічний напрямок опису фенотипічних ознак через кількісні, а не якісні, показники. Якісні показники при описі фенотипічних ознак вимірювалися за номінальною або порядковими шкалами. В рамках створення методики опису кількісними показниками фенотипічних

ознак відбувалося створення програмного продукту для точного вимірювання площі та розміру насінин. Було зібрано понад 3000 зображень насіння соняшнику, що охоплюють 250 зразків з різних генетичних ліній. Така різноманітність даних забезпечує широкую морфологічну варіабельність, що є критичною для побудови точних моделей комп'ютерного аналізу та автоматизованої обробки фенотипічних характеристик. Зйомка зразків здійснювалася за допомогою стаціонарної фотосистеми з фіксованою оптичною віссю та стабільними параметрами зйомки (відстань, освітлення, фокус), що забезпечувало уніфіковані умови реєстрації зображень та мінімізувало систематичні похибки, пов'язані з варіаціями перспективи та світлового середовища. Зображення насіння було отримано у видимому RGB-спектрі, що дозволяє аналізувати колірні характеристики за трьома основними каналами: червоним, зеленим та синім. Зразки насіння з червоним і синім маркуванням розміщувалися у фіксованій орієнтації по побічній діагоналі, що забезпечувало стабільність геометричного положення на зображеннях. Натомість зелені насінини фотографувалися з кількох проєкцій з метою формування більш повного набору вхідних даних для подальшого морфологічного аналізу (рис. 1). Для автоматизованої обробки зображень було реалізовано алгоритм сегментації на основі кольорових меж у RGB-просторі, який дозволяє точно виділяти контури насінин незалежно від умов зйомки. Цей підхід оптимізує процес попередньої обробки зображень, забезпечуючи високу точність у виявленні колірних і розмірних характеристик. Алгоритм автоматично визначає діапазони кольорів (мінімальні та максимальні значення) у межах сегментованої області насінини.



Рис.1 – Фото смугастої насінини соняшнику у різних умовах фотографування: верхній ряд на білому фоні, нижній на червоному, зліва на право фото у червоному світлі, синьому, зеленому та білому

Реалізація такого підходу дає змогу автоматизувати процес збору кількісних характеристик насінин, що суттєво підвищує ефективність селекційного аналізу. Отримана база даних забезпечує надійну основу

для фенотипового аналізу та підтримує сучасні селекційні дослідження соняшнику

Робота виконана в рамках договору про співробітництво між Інститутом олійних культур НААНУ та Національним університетом «Запорізька політехніка», НДР 05014 «Прийняття ефективних рішень на основі інтелектуальних технологій та відкритих даних».

Література

1. Bakurova, A., Vedmedeva, K., Vedmedev, S., Tereschenko, E. (2023). Ontological Model of Helianthus Cultivation in Ukrainian Conditions CEUR Work-shop ProceedingsThis link is disabled., 3396, pp. 130–140.

APPLYING WAVELET ANALYSIS TO DATA VALIDATION IN RISK ASSESSMENT SYSTEMS

Pavlo Hrynenko, Anna Bakurova
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ВАЛІДАЦІЇ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ОЦІНКИ РИЗИКІВ

Павло ГРИНЧЕНКО, Анна БАКУРОВА
НУ «Запорізька політехніка»

Abstract. The research focuses on two main developments: the Network Anomaly Detection System NADS and the fuzzy logic-based ACRAM access control risk assessment methodology. In this study, we propose an approach for data validation and anomaly detection in risk assessment systems using wavelet analysis. The methodology can be integrated into risk analysis systems to enhance cybersecurity protection. Experimental results show a strong inverse correlation between detection reliability and anomaly severity, which confirms the system's adaptability to dynamic threats. Furthermore, an additional energy-based component analysis revealed that the anomaly detection system exhibits a moderate level of stability. The derived threshold values enabled the identification of unstable time intervals, offering a practical means to refine future system reliability assessments.

Introduction. The work develops a new method for Applying Wavelet Analysis to Data Validation in Risk Assessment Systems.

The first development is a network intrusion detection system (hereinafter referred to as NADS) and its comparison with existing open systems.

The object of second development the study is three information systems. The first system (S1) is a functioning system, the state of which can be normal or abnormal, described by a set of system parameters at a certain point in time. That is, there are time series describing the normal behavior of this system and deviations from it.

The second system (S2) is designed to detect abnormal activity in the first system. The output of this anomaly detection system is represented by a time series, each of the values of which characterizes the state of the system at a certain point in time by two parameters – the confidence of the second anomaly detection system in assessing the state of the first system and the severity of the anomaly that occurred in the first system.

ACRAM (S3) is a risk assessment methodology developed within the Telemetry project, aimed at adaptive threat management and predictive risk analysis in complex information systems.

The purpose of the study is to develop a method for assessing the sustainability of the anomaly detection system based on the analysis of changes in the confidence of the system and the severity of the detected anomalies using wavelet analysis to verify data in the risk assessment system (the third system - S3).

Main Part. NADS is a network signal modeling method for detecting network anomalies that combines wavelet approximation and system identification theory. This work proposes a novel technique for modeling network signals to detect anomalies in networks. Specifically, the overall architecture of our approach, illustrated on the (Fig.1), consists of three main components: feature analysis, modeling of normal network traffic using wavelet approximation combined with ARX-based forecasting, and intrusion decision-making.

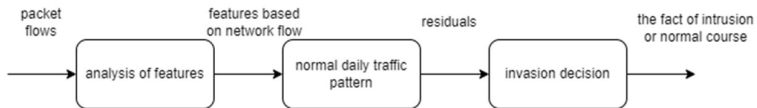


Fig.1 - The main architecture of the “NADS” system

During feature analysis, we define and generate a list of features to characterize network traffic behavior, and we expect that the greater the number of features, the more accurately the traffic volume information for the entire network will be characterized. This differs from current wavelet-

based network anomaly detection approaches, as most of them use a limited number of features or existing features from a publicly available intrusion detection dataset as inputs.

Once a prediction model for normal network traffic is obtained, it can be used to distinguish between normal and anomalous signals. When the input to the model consists solely of normal traffic, its output—referred to as the residuals—remains close to zero, indicating that the predicted value closely matches the actual normal input. Conversely, when the input includes both normal and anomalous traffic, the residuals exhibit significant peaks at the locations of anomalies. In this case, the residuals can be viewed as a mathematical transformation that suppresses normal network data while amplifying anomalous patterns.

During the course of this research, it was determined that while NADS is indeed an effective protection method, a more efficient approach lies in preventive actions. Therefore, a strategic decision was made to shift the focus of system protection towards the development of a risk assessment methodology for access control, referred to as ACRAM.

Our research is based on an access control methodology developed using fuzzy logic. Within this framework, we analyzed specific common vulnerabilities and their associated risks, relying on the CVSS standard to determine system parameters.

(Fig.2) shows the Structure of a fuzzy inference system for assessing the severity of vulnerabilities in a network system.

The system includes a set of input parameters modeled as linguistic variables, and a single output parameter that provides an assessment of the severity of vulnerability consequences. All components of the system are interrelated and collectively influence the final result.

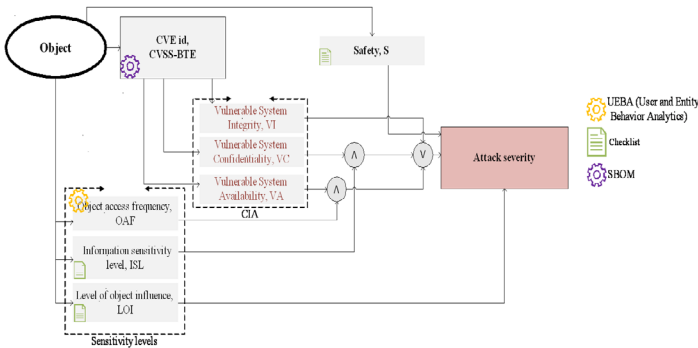


Fig.2 - Structure of a fuzzy inference system for assessing the severity of vulnerabilities in a network system

Let us take a closer look at the main input parameters of the system.

The *Object Access Frequency (OAF)* parameter reflects how frequently a particular object is accessed by system entities.

The *Information Sensitivity Level (ISL)* refers to the classification of information based on its confidentiality, which often determines the level of protection and the control mechanisms required.

The *Level of Object Influence (LOI)* describes the extent to which an object in the system affects other components.

The *CIA Impact Metrics group (Confidentiality, Integrity, Availability)* is used to evaluate the potential impact of security breaches on the system's confidentiality, integrity, and availability.

This group includes the following vulnerability metrics:

- *Vulnerability System Integrity (VI)* measures the system's vulnerability to integrity violations.
- *Vulnerability System Confidentiality (VC)* addresses the system's susceptibility to breaches that could compromise the confidentiality of sensitive information.
- *Vulnerability System Availability (VA)* assesses potential threats to the system's availability, such as risks that may prevent authorized users from accessing the system or its data.

Special attention is given to the Safety metric, which accounts for the presence of AI-based objects in the system. This metric evaluates the potential impact on the physical safety of human actors or participants who could plausibly be harmed as a result of exploiting a vulnerability-particularly relevant in systems involving AI-powered robots).

The output parameter of the system is Attack Severity – an indicator that reflects the potential damage or impact an attack may have on the system. It helps assess the seriousness of an attack, including the scale of the damage and the effort required for recovery.

The severity scale consists of five levels, ranging from Slight to Catastrophic, each defined by clearly specified membership functions to enable accurate risk assessment.

To improve the efficiency of our ACRAM methodology, it was decided to use the discrete wavelet transform to pre-validate the input data. The method is developed using the 4th order Daubechies wavelet transform (DB4), which allows:

- to separate normal system behavior and abnormal states by analyzing various frequency components of the signal;
- to decompose the signal into approximating and detailing coefficients, which helps to identify system instability.

The use of DB4 wavelets in this study is due to their unique properties:

- compact carrier – allows for efficient analysis of local signal features;
- good frequency localization – wavelets are capable of decomposing a signal into frequency components without loss of information;
- orthogonality – enables accurate signal reconstruction;
- smoothness – DB4 is smooth enough for time series analysis [1].

Fourth-order wavelets provide a balance between time localization, frequency resolution, and computational complexity. They are particularly suitable for analyzing data associated with abrupt changes, which is typical for anomaly detection systems.

The developed method for assessing the robustness of an anomaly detection system includes several key steps.

First of all, the DB4 wavelet transform is used, which allows separating long-term trends and short-term fluctuations in the system's confidence. This makes it possible to identify uncharacteristic changes in its operation, which is especially important when analyzing the behavior of an anomaly detection system.

The energy of the components is calculated, characterizing the intensity of high-frequency changes in the signal, which allows for a more accurate assessment of the level of instability of the system.

Stability criteria are used for a comprehensive assessment of the system performance (S2):

1) correlation coefficients between system confidence and the severity of anomaly in (S2);

2) results of energy analysis of signal components, as well as an assessment of the level of instability of S2 through energy thresholds.

The next step is statistical analysis, which determines the correlation between the system's confidence and the severity of the detected anomalies.

The behavior of the system (S2) is analyzed during transitions between the state of normal system operation and its abnormal behavior, which allows for the analysis of the system behavior, for example, the relationship between the level of confidence of the system in detecting anomalies and the severity of the anomalies.

Determination of instability levels (S2) is carried out based on the analysis of the energy of the components, which allows for a quantitative assessment of the system's stability (S2) to external disturbances. In addition, a correlation analysis of the confidence and severity of anomalies is performed, which helps determine the degree of consistency of the system's conclusions.

The developed data validation method was tested for integration with the ACRAM risk assessment system (S3) [2].

Main areas of application of the developed method in ACRAM:

- preliminary data screening to determine the reliability of input data and identify periods of instability (S2);
- data filtering to exclude periods of high instability from the risk assessment analysis;
- integrated assessment can be used in conjunction with ACRAM for two-level risk analysis;
- verification of risk assessment results will improve the accuracy of conclusions (S3).

The developed method was tested by analyzing the test data obtained as a result of the work (S2). The study revealed a significant negative correlation (-0.853) between the confidence of the system (confidence) and the severity of the detected anomalies (severity). This means that as the severity of the detected anomaly increases, the confidence of the system (S2) decreases. This result confirms that the system adequately responds to anomalies, reducing confidence when moving to more critical states.

The approximation coefficients were calculated using formula (1) (using a sliding window with cyclic continuation) [3]:

$$y[n] = \sum_k a_k y_k[n], \quad (1)$$

where: $y[n]$ is the approximated signal; $y_k[n]$ is information about the confidence of the system; a_k are the approximation coefficients.

In the context of wavelet analysis, we consider an approximation with a step of 2, i.e., from 100 input values we get 50 approximation values. This is with the principle of operation of the wavelet transform. Decimation allows you to reduce the redundancy of the signal representation.

To reconstruct the signal from the approximation, we use formula (2) [4]:

$$x[n] = \sum_{j=1}^{+\infty} \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{j,k} \tilde{h}_j[n - 2^j k] + \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_{j,k} \tilde{g}_j[n - 2^j k], \quad (2)$$

where: $x[n]$ is the reconstructed signal; $c_{j,k}$, $b_{j,k}$ are the decomposition coefficients;

$$h = [0.4829629131445341, \quad 0.8365163037378079, \\ 0.2241438680420134, -0.1294095225512604]$$

$g = [-0.1294095225512604, -0.2241438680420134, 0.8365163037378079, -0.4829629131445341]$

This gives us reconstructed signal values which are used for further analysis.

The correlation between confidence and seriousness was calculated using formula (3) [5].

$$r_{XY} = \frac{cov_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

where: X, Y are time series, each of the values of which characterizes the state of the system at a certain point in time by two parameters - the confidence $S2$ of detecting an anomaly when assessing the state $S1$ and the severity of the anomaly that occurred in $S1$; $\bar{X}, \bar{Y}$ are the average values of the time series; r is the correlation coefficient.

Example of calculating the transition of the system state from Off (no anomaly) to Red (anomalous behavior)

In the context of the wavelet transform, we can say that the signal is a sum of different components, each of which reflects certain features of the signal at different scale levels (or frequencies). These components contain information about the high-frequency and low-frequency variations of the signal.

The sum of the energy of these components is equal to the total energy of the original signal, which means that the wavelet transform is an energy-efficient process.

Wavelet analysis allows one to calculate the component energy – a metric that reflects the level of instability of the system [6] according to the formula (4).

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n], \quad (4)$$

where x is a real number.

For different time intervals, the mean energy value (2.968) and standard deviation (0.0894) [7] were calculated using the formula (5).

$$STD = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n}}, \quad (5)$$

where:

X – individual energy window values calculated as the sum of squares based on the time series of component energies;

$\bar{X}$ – average window energy value;

n – number of windows.

Using formulas (4) and (5) the threshold values of instability were determined S2:

- lower threshold: 2.879;
- average threshold: 3.057;
- high threshold: 3,147.

The average energy per window (2.968) was between the lower and middle thresholds, indicating a medium level of system stability (S2). The study was able to identify time intervals in which the system demonstrated instability. This is important for further improvement of the anomaly detection method. (S2).

Conclusion. The CVEs reviewed in the study highlight the urgent need to implement effective protection mechanisms. Prioritize regular system updates to preserve data and prevent attacks. Prioritize maintaining a proactive approach to system security.

The further research plan involves developing scenarios of potential vulnerability actions in certain systems and protection strategies to reduce risks.

The developed method for assessing the stability of the anomaly detection system has proven its effectiveness, allowing us to assess the stability of the anomaly detection system (S2).

During the analysis, it was confirmed that the use of the DB4 wavelet transform effectively solves the problem of separating normal and abnormal behavior of the system, ensuring accurate detection of unstable states.

One of the key findings of the study was the identification of a significant negative correlation (-0.853) between system confidence and the severity of detected anomalies.

Additional calculation of the component energy showed that (S2) demonstrates an average level of stability. The calculated threshold values allowed classifying the time intervals of instability, which makes it possible to take them into account in the future when assessing the reliability of the system.

The goal of further research is to integrate the proposed method for assessing the stability of the anomaly detection system with the ACRAM system (S3)

References

1. Rajesh T. (2014). Image Reconstruction Using Wavelet Transform with Extended Fractional Fourier Transform. Blekinge Institute of Technology.
2. Lytvyn, V., Bakurova, A., Zaritsky, O., Gritskevych, A., Hrynchenko, P., Tereschenko, E., Shyrokorad, D. (2024). Fuzzy logic-based methodology for building access control systems based on fuzzy logic. 6th International Workshop on Modern Data Science Technologies. Ukraine: Lviv-Shatsk.
3. Oppenheim A. V., Schaffer R. W., Buck J. R. (1998). Discrete-Time Signal Processing. Second edition, p.41.
4. Rioul O., Duhamel P. (1992). Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms. IEEE Transactions on information theory, vol. 38, № 2, p.4.
5. Correlation. Retrieved from: <https://w.wiki/EPHp>.
6. Energy of a signal. Retrieved from: <https://www.gaussianwaves.com/2013/12/power-and-energy-of-a-signal/>.
7. Standard deviation. Retrieved from: <https://berg.com.ua/indicators-overlays/stddev>.

ПРИКЛАДНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ АНОМАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ СУБ'ЄКТІВ У ІТ- ІНФРАСТРУКТУРАХ

Гріцкевич А.А.,
аспірант НУ «Запорізька політехніка»

APPLIED SOLUTION FOR RISK ASSESSMENT OF ANOMALOUS SUBJECT BEHAVIOR IN IT INFRASTRUCTURES

Gritskevych A.A., PhD student at National University "Zaporizhzhia
Polytechnic"

Цифрова економіка в наш час розвивається стрімко, разом з цим швидко зростають розміри та різноманітність ІТ-інфраструктур. В таких умовах задачі кібербезпеки не втрачають актуальність, зокрема контроль поведінки ІТ користувачів (суб'єктів), визначення аномальності їх поведінки, що в тому числі формує ризик. Незважаючи на велику кількість методів і інструментів, оперативно узгодити і інтегрувати готові рішення з внутрішніми політиками часто буває

складним завданням - конфлікти між внутрішньою політикою та комерційними продуктами, обмеження гнучкості, тривалість розробки, впровадження складних систем контролю та інше. В таких умовах необхідно використовувати такі методи, які дозволяють тимчасово підвищити рівень кібербезпеки, поки не буде системного рішення.

Існує ряд ефективних методів виявлення аномалій поведінки суб'єктів, однак їм не вистачає адаптивності, урахування всіх факторів впливу і адекватної кількісної оцінки ризику. У статті [1] представлено метод MG-UABD, який базується на багаторівневому аналізі для виявлення аномальної поведінки користувачів. У той час як грубий модуль знаходить потенційно аномальних користувачів, дрібний модуль уточнює оцінку. Для виправлення дисбалансу класів застосовуються методи надсемплінгу та підсемплінгу. На наборі даних CERT R4.2 система продемонструвала високу точність, однак вона ігнорує часові фактори, кількісну оцінку ризику та контекст дій. У [2] розглянуто застосування UEBA для інтеграції в системи управління ідентичністю (FIM). Пропонується створювати відбитки сесії користувачів, на основі яких визначатиметься нетипова поведінка, не пропонуючи змін до інфраструктури. Це може бути ефективно використано для складних розгалужених систем, але також не достатньо формалізує оцінку аномальності і всі значущі фактори впливу. Стаття [3] показує метод UBAD з OLAP-кубами і статистичними тестами (врах. Peasock). Такий підхід об'ємно оцінює поведінку користувачів і достатньо точно оцінює аномальність, при цьому його реалізація потребує великих обчислювальних ресурсів, а також може бути ускладнена динамічна аналітика. Розгляд наявних рішень і їх недоліків дає мотивацію до подальших досліджень і розробки.

Також на ринку програмного забезпечення доступні різні системи, які реалізують підходи до збору, моніторингу й аналізу поведінкових подій. Такі системи моніторингу безпеки та централізованого логування як Wazuh, які забезпечують збір, моніторинг та аналіз загроз, виявлення інцидентів на кінцевих пристроях мають готові сценарії, прозорість та безкоштовну доступність. Але для оптимального відслідковування аномалій і адаптації ПЗ до змінних умов в системі користувач - інфраструктура необхідна велика частка ручного налаштування. Моніторинги за ефективністю співробітників, такі як UAM Ekran, збирають значну кількість даних про сесії суб'єктів на їх робочих просторах (враховуючи кейлогери, взаємодію з файлами, запущені програми). Забезпечується жорсткий контроль в динаміці, але такого моніторингу використання може обмежуватися етичними,

корпоративними нормами або законом при також великій частці ручної роботи при налаштування тригерів на аномальні дії. Хмарні рішення класу SIEM/SOAR із вбудованим модулем штучного інтелекту та UEBA (User and Entity Behavior Analytics), такі як Azure Sentinel, здатні виявляти складні загрози на основі поведінкових патернів, навіть у випадках, коли події не відповідають класичним шаблонам. Підтримують високу автоматизацію, проте мають високу вартість, а наведений приклад ще і має суттєву залежність від екосистеми Microsoft. Екосистеми вже для побудови централізованої системи логування, аналізу та візуалізації, такі як Elastic Stack, можуть включати модулі машинного навчання, що дозволяють виявляти аномалії у часових рядах і профілях поведінки без потреби у шаблонах. Рішення добре масштабується, але вимагає високої технічної експертизи. Розгляд інструментів на основі штучного інтелекту, таких як NeuralLog, який дозволяє виявляти складні аномалії та поведінкові відхилення за допомогою аналізу трансформерної моделі на основі AI-аналітики, навіть якщо вони не вписуються у класичні шаблони або заздалегідь визначені правила, добре працює в умовах гнучкого середовища, забезпечуючи адаптивний аналіз, але потребує запуску спеціалізованих AI-моделей, наприклад у Python-середовищі, що створює певний поріг входу для впровадження та експлуатації. Подальші дослідження доцільно спрямовувати на розробку універсальних і адаптивних рішень, здатних працювати без тривалих процесів налаштування, а також інтегрувати додаткові поведінкові фактори і оцінку ризику.

Отже для вирішення проблематики, як одна із опцій пропонується метод визначення аномальної поведінки на рівні людина-машина на основі аналізу та фільтрації логів суб'єкта (від звичайних користувачів до адміністраторів), і визначення аномальності за допомогою апарату нечіткої логіки. Так під аналіз попадають не тільки взаємодія юзерів з системою доступу і сервісами IT інфраструктури, а і його поведінку на локальному робочому просторі, будь то робочі ПК, мобільні пристрої або особисті гаджети на ремоуті, з урахуванням помилок або зловмисних дій. Останнє в тому числі розглядається зі сторони поведінкової економіки (по Талеру) і може бути виявлено по таким характеристикам роботи суб'єкта як особливості вводу (швидкість набору тексту, виправлення), взаємодія з додатками (частота переведу вікон в активний режим та запуск незвичних скриптів або програм). В цій площині також може бути додатково виявлені такі загрози, як активність ботів, надмірний цікавість функціями чи даним, які виходять за зону відповідальності суб'єкта та пошук вразливостей системи.

Нечітка логіка в розрахунку і оцінці аномальності реалізована у визначенні нечітких множин, формуванні правил, до прикладу :

IF (швидкість набору = високий рівень) AND (нетиповість переходів між розділами = високий рівень) THEN (оцінка аномальності = високий рівень).

“Оцінка аномальності” = функція зростає від нетипової швидкості дій суб'єкта.

Це відбувається на основі релевантних стандартів і оцінки експертів, з формуванням функції належності. Вказаним математичним апаратом оброблюються отримані дані після збору і фільтрації логів суб'єктів, які відображають їх типову чи нетипову поведінку в роботі і інфраструктурою - так досягається гнучкість у визначенні аномальності, адже формується формалізована оцінка, чим уникається чітка оцінка з високою вирігідністю помилки. Авжеж це дозволяє ефективніше описувати реальні сценарії поведінки і міряти поведінку людей користувачів, яка складно описується, для адекватної реакції на запобігання або вирішення інцидентів в кібербезпеці. Пропонована методологія також узгоджується і є частиною методології оцінки ризиків доступу до ІТ систем ACRAM (Access Control Risk Assessment Methodology), яка розробляється під патронатом проекту Telemetry програми Horizon Europe і оцінює ризик кібербезпеки на основі широкого кола характеристик об'єктів (цінність і потенціал експлуатування вразливостей) і суб'єктів (рівень довіри).

В тезах наведено один з експериментів на тестових суб'єкті і сервісах потенційної ІТ інфраструктури, логування дій якого збиралося і оброблялося з використанням базової SIEM збірки.

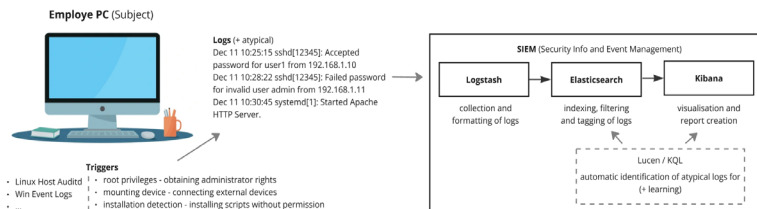


Рис. 1 - Експеримент на тестових суб'єктах і сервісах

Для оцінки факторів, які не мають чітких значень, були використані лінгвістичні змінні.

Таблиця 1
Лінгвістичні рівні

Рівні	Низький	Середній	Високий
Частка унікальних команд	0 - 0,4	0,5 - 0,7	0,8 - 1
Глибина доступу до файлів	0 – 3	4 - 6	7 - більше
Завантаження та запуск скриптів	0	0,5	1
Запуск нестандартного ПЗ	0		1
Частота перемикання між додатками	0 – 15	16 - 50	51 - більше

На основі правил типу "якщо - то" здійснюється нечітке виведення, що дозволяє оцінити рівень аномальності кожного суб'єкта.

Таблиця 2

№	CUR	FAD	SDR	NBE	CSR	SAB
1	низький	низький	низький	низький	низький	низький
2	середній	низький	низький	низький	низький	низький
3	високий	низький	низький	низький	низький	середній
4	високий	високий	низький	високий	середній	високий
5	середній	середній	високий	низький	низький	середній
6	високий	середній	високий	низький	високий	високий
7	низький	високий	високий	високий	середній	високий
8	середній	високий	низький	низький	низький	середній
9	високий	середній	високий	високий	високий	високий
10	середній	середній	низький	низький	середній	середній
11	високий	високий	високий	високий	високий	високий
12	високий	високий	високий	високий	високий	дуже високий

Оцінка рівнів аномальності

За вказаною методикою була виконана оцінка тестового суб'єкта по згенерованим логам типу:

2024-01-24

14:43:00,Document

-

WordPad,wordpad.exe.,[Keystrokes]: secret

2024-01-24 14:47:00,Edited text,wordpad.exe,,[Keystrokes]:
 confidential data
 2024-01-24 14:54:00,Edited text,wordpad.exe,,[Keystrokes]:
 confidential data
 2024-01-24 14:59:00,Document -
 WordPad,wordpad.exe,,[Keystrokes]: restricted
 2024-01-24 15:00:00,Program Manager,explorer.exe,,Opened
 sensitive document

Результати оцінки:

- Частка унікальних команд: 0,8 - високий;
- Глибина доступу до файлів: 1 - низький;
- Завантаження та запуск скриптів: 0,5 - середній;
- Запуск нестандартного ПЗ: 1 - високий;
- Частота перемикань між додатками: 6 - низький;
- Рівень аномальної поведінки: дуже високий.

У результаті проведення експерименту отримані перші адекватні результати для оцінки ступеня аномальності у взаємодії користувача з тестовою ІТ-інфраструктурою. Результати експерименту дають підстави вважати що обрана методологія ефективна та має потенціал на розвиток, в тому числі можливість адаптуватися до різних інформаційних середовищ без попереднього налаштування або інтеграції в систему. Таке рішення може стати основою для реалізації рішень для підвищення кібербезпеки на підприємствах і в організаціях. Дослідження, які будуть проведені в майбутньому, можуть бути зосереджені в тому числі на методах протидії соціальній інженерії. Це дозволить підвищити точність, гнучкість і контекстну чутливість при виявленні підозрілої активності.

References

1. Feng, W., Cao, Y., Chen, Y., Wang, Y., Hu, N., Jia, Y., & Gu, Z. (2025). Multi-Granularity User Anomalous Behavior Detection. *Applied Sciences*, 15(1), 128.
2. Martín, A. G., Beltrán, M., Fernández-Isabel, A., & Martín de Diego, I. (2021). An approach to detect user behaviour anomalies within identity federations. *Computers & Security*, 108, 102356.
3. Prarthana, T. S., & Gangadhar, D. N. (2017). User Behaviour Anomaly Detection in Multidimensional Data. 2017 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM), 3-10.

YOLO-БАЗОВАНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ РОГІВ ОЛЕНІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

А.В. Литвиненко

Національний університет «Запорізька політехніка»

YOLO-BASED DEER ANTLER RECOGNITION FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

A.V.Lytvynenko

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. *This paper proposes a method for recognizing deer antlers in images obtained from camera traps using the YOLOv8 neural network architecture, based on experience in UAV detection.*

У сучасних умовах зростання зацікавленості у збереженні біорізноманіття та моніторингу популяцій диких тварин особливу увагу приділяють безконтактним методам спостереження. Одним з найбільш перспективних інструментів є використання фотопасток у поєднанні з алгоритмами комп'ютерного зору [1, 2].

У даній роботі запропоновано метод розпізнавання рогів оленів на зображеннях, отриманих з фотопасток, з використанням неймережевої архітектури YOLOv8, спираючись на досвід виявлення БПЛА [3].

Метою дослідження є створення інструменту, який дозволить автоматично ідентифікувати тварин за характером рогів, що, у свою чергу, дає змогу вести спостереження за популяцією без стресу для самих тварин. Такий підхід дозволяє не лише відстежувати кількість особин, а й оцінювати індивідуальні характеристики: вік, генетичну якість, наявність травм або патологій.

Для навчання моделі було зібрано понад 500 зображень, які охоплюють різноманітні умови зйомки — денне та нічне освітлення, зимовий і літній періоди, різні види оленів. Це забезпечує різноманітність даних, необхідну для ефективного навчання моделі [4]. Розмітка здійснювалася вручну за допомогою інструмента LabelImg у форматі YOLO. Особливу увагу було приділено точності обведення рогів, оскільки невеликі похибки суттєво впливають на якість розпізнавання.

Навчена модель показала точність 91.4%, повноту 88.7% та F1-оцінку 90.0% на валідаційній вибірці. Було встановлено, що розпізнавання рогів відбувається ефективніше на зображеннях з природним освітленням та контрастним фоном. Проте навіть за низької

якості зображення (вночі або за дощу) модель демонструвала прийнятні результати.

Результати експериментів свідчать про перспективність застосування глибокого навчання у сфері екологічного моніторингу.

Окрім прямого використання для обліку тварин, така система може стати основою для побудови автоматизованих систем контролю динаміки популяцій

[5, 6], виявлення порушень середовища існування та оперативного реагування на зміни у фауні конкретних регіонів.

На основі отриманих результатів було створено прототип веб-інтерфейсу, який дозволяє завантажувати зображення і в режимі реального часу отримувати інформацію про кількість виявлених особин та їхні ознаки. Подальші плани включають інтеграцію з геолокаційними сервісами та побудову часових графіків для аналізу сезонної активності тварин.

Література

1. Lan W.; Dang J.; Wang Y.; Wang S. Pedestrian detection based on YOLO network model. *In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Changchun, China, 5–8 August 2018; P. 1547–1551.
2. Hsu W.Y.; Lin W.Y. Adaptive fusion of multi-scale YOLO for pedestrian detection. *IEEE Access* 2021. 9, P. 110063–110073.
3. Казіонов М., Скрипник Т., Пасічник О., Вознюк, Л. Вдосконалений метод виявлення БПЛА за тепловізійними зображеннями на основі моделі глибокого навчання YOLO. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. 347(1), P. 571-575. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-79>
4. Карпаті А., Фей-Фей Л. Глибокі візуально-семантичні вирівнювання для генерації описів зображень. *CVPR*. 2015. С. 3128–3137.
5. Tian Y.; Yang G.; Wang Z.; Wang H.; Li E.; Liang, Z. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model. *Comput. Electron. Agric.* 2019. 157. P. 417–426.
6. Wu D.; Lv S.; Jiang M.; Song H. Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments. *Comput. Electron. Agric.* 2020. P. 178, 105742.

Rosella Omana MANCILLA, Master's degree,
ENGINEERING Ingegneria Informatica S.p.A., Software
Development Specialist, Roma, Italia
**A FEDERATED LEARNING BASE ANOMALY DETECTION
SOLUTION**
**A FEDERATED LEARNING BASE ANOMALY DETECTION
SOLUTION**
Rosella Omana Mancilla,
ENGINEERING Ingegneria Informatica S.p.A.

Abstract. Adhering to NIST guidelines and the NIS Directive is essential for securing Internet of Things (IoT) ecosystems, which face growing cybersecurity and privacy risks due to their expanding attack surface. Intrusion Detection Systems (IDS) are critical for monitoring network traffic and identifying threats. While traditional IDS rely on signature-based detection, modern systems must also incorporate anomaly detection to identify unknown threats and zero-day attacks by analysing deviations from normal behaviour.

However, deploying anomaly detection in resource-constrained IoT environments poses challenges, including increased computational load and risks associated with centralized data analysis. To address these concerns, this paper investigates the application of **federated learning (FL)** as a privacy-preserving approach to anomaly detection in IoT networks. FL allows decentralized model training across devices without sharing raw data, enhancing both privacy and scalability. This paper highlights the benefits and trade-offs of FL-based IDS, emphasizing the need for solutions that balance detection accuracy, system performance, and data privacy in securing future IoT infrastructures.

In the realm of cybersecurity and data privacy, Internet of Things (IoT) devices introduce significant vulnerabilities due to their extensive deployment and integration across interconnected systems. These devices often communicate both internally with other system components and externally with remote services, creating multiple points of entry for potential cyber threats. If not equipped with robust security protocols, IoT devices can become gateways for attackers, jeopardizing the integrity of the entire network and increasing the risk of data breaches that can severely undermine user privacy.

Mitigating these threats requires a comprehensive approach to securing the underlying infrastructure against both unauthorized access and malicious behaviours. As cyberattacks evolve in complexity and frequency, research

into intrusion detection has increasingly focused on anomaly detection techniques. These methods attempt to identify suspicious or previously unseen activities by examining patterns and deviations from historical behavioural data.

However, the implementation of anomaly detection in IoT ecosystems presents its own challenges. These systems often operate with limited processing power and resources, and introducing complex detection algorithms can degrade system performance or even compromise user privacy if not carefully managed. Additionally, centralized models that aggregate traffic data for analysis may offer enhanced detection capabilities due to access to larger datasets, but they also elevate the risk of privacy breaches. If such data is not thoroughly anonymized and secured, it could inadvertently expose sensitive information.

In these circumstances, Federated Learning with its decentralized approach can help in identifying anomalous behaviour, in fact it has becoming an emerging topic in recent research [1][2].

With these assumptions we build an *Anomaly-Based Component for Intrusion Detection* that aims at identifying anomalies while applying Federated Learning Approach [3][4], more precisely is to “Collaboratively identifying deviations from normal patterns, potential ability to detect distributed threats or emerging vulnerabilities while preserving data privacy across the network”.

The main reasons which are also the benefit provide by the approach are:

- decentralized training - detection model is collaboratively generated by peer devices to distribute effort;
- every device can update the detection model locally for specific local conditions and/or traffic patterns;
- privacy is preserved because peer detection models are aggregated by the centralized node but without sharing peer dataset;
- the detection is applied at device level, potentially identifying distributed anomalous events.

The steps for FL training are:

1. model0 initialization in central node (or FL server)
2. Sending model0 to device in the federation
3. Local detection model training using local dataset
4. Returning model parameters to the central node
5. Aggregation of the model parameters into a new detection model modelz
6. Repeat steps 1 to 5 until the model converges

The aggregated model is saved as global model, sent to all devices in the federation for local anomaly detection. During operational phase the model is used to analyse the network traffic in real-time on the device/participant and identifying what is normal to what is anomalous.

Two important aspects to consider for Federated Learning approach that can potentially alter results are:

- the aggregation algorithm used by the server to aggregate model updates;
- the algorithm used by the client to train the anomaly detection model.

The key is to select the best combination of the two for the type of anomaly detection to be applied and the context: fine tuning is important stage of designing machine learning (ML) based solutions.

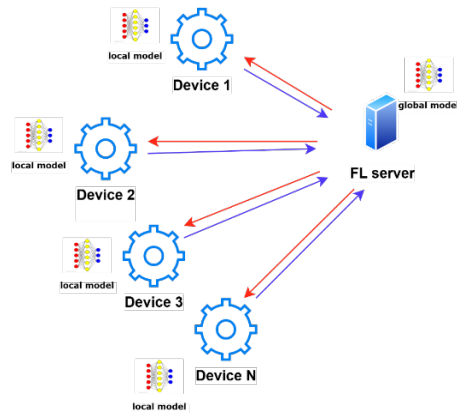


Figure 1 - Federated Learning, collaborative detection model training

Federated Learning optimisation is a hot topic and research are still ongoing to identify optimized methods for model convergence [5].

In the following table, a list of potential aggregation strategies and algorithms that are potentially used.

Table 1 - Federated Learning potential aggregation algorithms

Name	Description	Benefits
Federated Averaging (FedAVG)	The server performs weighted average of model updates from different clients when data is mostly homogenous	Simple, intuitive, easy to implement

Federated Proximal (FedProx)	It is based on FedAVG but introduce a limit (proximal term) in how much local models can deviate from the global model	Useful when data is heterogenous
Federated Optimisation (FedOpt)	Is a family of optimisation algorithms that introduces adaptive optimizers	Useful when data is heterogenous and potentially improves coverage speed

On the algorithm used by the FL participants or clients, there are three potential categories that define the type of anomaly detection is being performed:

- Deep Learning-Based Anomaly Detection – uses deep learning models to detect complex high-dimensional anomalies;
- Machine Learning-Based Approaches - uses supervised or unsupervised ML models to classify normal vs. anomalous instances;
- Statistical Approaches – uses statistical methods for their lightweight and interpretability

Data distribution of the dataset used for training is also a relevant factors that can impact the accuracy, robustness and effectiveness of the detection system, - Independent and Identically Distributed (IID) or non-IID, others are the client Participation and dropout Rate, the synchronization, etc. but this first Proof of Concept (PoC) focus on few of them.

To start the process, data processing is an essential step to convey to a specific and predefined structure of the data: the standard used is the Netflow¹, suitable for its standardized and detailed capture of traffic flow data; it includes critical information such as IP addresses, port numbers, and byte and packet counts, which are essential for detecting anomalous behaviour in network traffic.

For this POC we used Flower FedMedian as aggregation strategy, which is based on FedAVG and we used Logistic Regression for Training and inference on the participant. The dataset used for training is the NF-ToN-IoT² provided by the Cyber Security Research Group at the University of New South Wales (UNSW), Australia, led by Dr. Nour Moustafa. Anomaly detection methods typically operate under the assumption that benign

¹ NetFlow is a network protocol created by Cisco that collects IP traffic information, making it a standard for traffic analytics in network management

² <https://research.unsw.edu.au/projects/toniot-datasets>

(normal) traffic significantly outweighs malicious activity, allowing anomalies to stand out clearly. However, **the NF-ToN-IoT dataset** used in this study is highly imbalanced, with a disproportionately large number of malicious packets compared to benign ones. This imbalance risks skewing the model's learning process, potentially leading it to misclassify malicious behaviour as normal, resulting in a high false positive rate. To mitigate this issue a subset of the NF-ToN-IoT dataset (approximately 90,000 records, or 6.5% of the full set) **was combined with 10,000 synthetically** generated benign records to create a more balanced dataset. This combined dataset was then split into 80% for training and 20% for testing, using 12 selected features.

After 30 rounds of federated aggregation, the model achieved an accuracy of 96%, see *Figure 2*: the model quickly improved its accuracy in the early training rounds and gradually slowed down, eventually reaching a stable accuracy close to 96%, which means it increases very quickly at first, then slows down over time, approaching a maximum value.. This behaviour is typical of exponential learning curves, the accuracy $A(r)$ is approximated by:

$$A(r) = 0.96 - 0.41 * e^{\{-0.10r\}}$$

This reflects a stable, generalizing model using FedAVG with Logistic regression. However, these results should be interpreted with caution. The synthetic benign data may not accurately reflect real-world traffic patterns, potentially introducing bias and giving a misleading impression of the model's performance. As a result, the model may perform well under test conditions but fail to generalize effectively in real deployment scenarios.

Further analysis will continue focusing on data preprocessing, dataset distribution, accuracy over combination of aggregation algorithm and the participant algorithm.

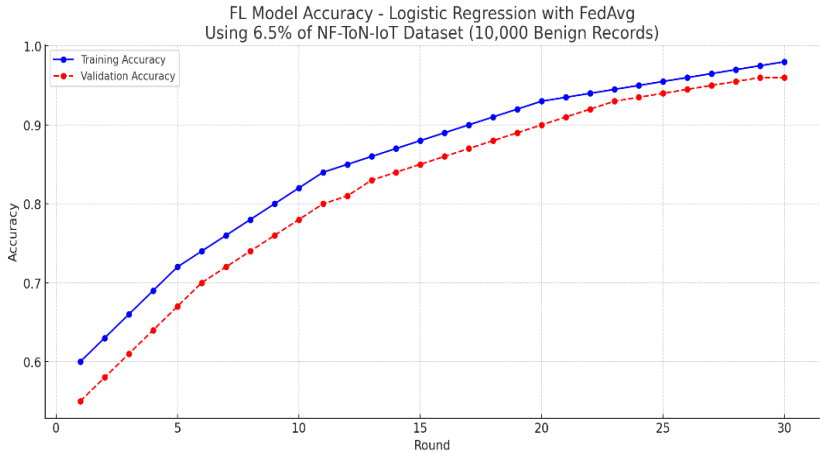


Figure 2 - Accuracy calculated in 30 rounds

References

1. Rey, V., Sánchez, P. M., Celdrán, A. H., & Bovet, G. (2022). Federated learning for malware detection in IoT devices. *Computer Networks*, 204.
2. Nguyen, T. D., Marchal, S., Miettinen, M., Fereidooni, H., Asokan, N., & Sadeghi, A. -R. (2019). DfIoT: A Federated Self-learning Anomaly Detection System for IoT. 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Dallas, TX, USA.
3. Brendan McMahan, H., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & Aguera y Arcas, B. (2017). Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data. *20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2017*.
4. Yang, Q., Liu, Y., Chen, T., & Tong, Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technologies (TIST)*, 10(2).
5. Reddi, S., Charles, Z. B., Zaheer, M., Garrett, Z., Rush, K., Konečný, J., . . . Brendan McMahan, H. (2021). Adaptive Federated Optimization. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2021)*.

ГРАФОВО-ОРІЄНТОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ОНТОЛОГІЯМИ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ДОСВІД ІНТЕГРАЦІЇ В NEO4J

Іван Омеляненко

Національний університет «Запорізька політехніка»

GRAPH-BASED ONTOLOGY CONTROL SYSTEM FOR THE AGRICULTURAL DOMAIN: INTEGRATION EXPERIENCE IN NEO4J

Ivan Omelyanenko

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. The article presents the ontology management system implemented on the Neo4j graph database platform. The system enables users to upload, store, import, and merge ontological models through an intuitive user interface. A key advantage of the system is its ability to support efficient ontology management without requiring proficiency in specialized query languages used for graph databases. The developed system is part of a broader research initiative aimed at integrating the domain ontology of sunflower cultivation in Ukraine into the pan-European ontological framework.

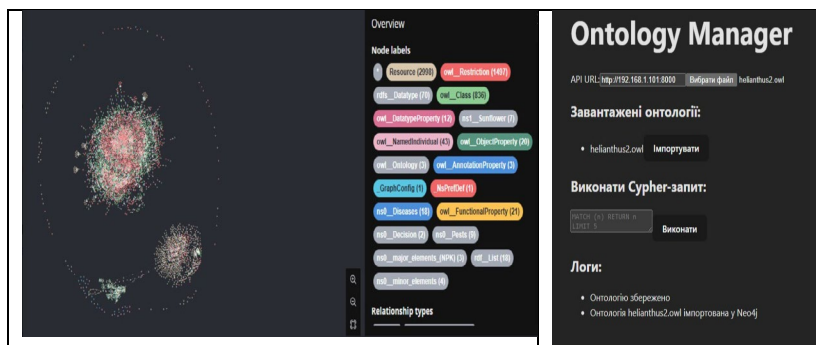
Створення системи керування онтологіями в Neo4j є частиною завдання інтеграції предметної онтології агротехнології вирощування соняшнику в Україні в загальноєвропейську спільноту. Головною метою системи є забезпечення інтерактивного, зручного для дослідників інтерфейсу для керування онтологічними моделями без необхідності глибоких знань мов запитів до графових баз даних. Система керування онтологіями в Neo4j дозволяє завантажувати, зберігати, імпортувати та об'єднувати онтології в графовій базі даних Neo4j.

Онтології застосовують для автоматизації процесу формулювання нових знань за допомогою логічних і семантичних методів, підвищуючи ефективність систем підтримки рішень. У цьому дослідженні розглядається можливість розширення наявних онтологій, присвячених вирощуванню соняшнику, шляхом їх інтеграції (рис.1,а). Основними джерелами слугують онтології **Helianthus Ontology** та **Helianthus Phenotype** [1]. Ці онтології були створені у співпраці з фахівцями Інституту олійних культур НААН України. У процесі розробки враховувався досвід національних експертів у галузі селекції, генетики й агротехнології вирощування соняшнику, а також чинні державні стандарти України. Додатковим джерелом слугує європейська

Sunflower Ontology з ресурсу **Crop Ontology** [2]. Для здійснення об'єднання було обрано **семантичні методи зіставлення**. Семантичний підхід було обрано з огляду на змістовну специфіку предметної області агротехнології вирощування соняшнику, в якій терміни, що описують процеси й об'єкти, є релевантними онтологічним класам.

Систему реалізовано у вигляді веб-застосунку з використанням сучасного стеку технологій (рис.1,б). Клієнтська частина розроблена мовою JavaScript, тоді як серверна логіка реалізована за допомогою фреймворку FastAPI на мові Python. Усі дані зберігаються в графовій базі даних Neo4j, що забезпечує ефективну роботу з онтологічними структурами. Завдяки контейнеризації за допомогою Docker система є портативною та зручною для розгортання в різних середовищах. Крім того, вона підтримує кілька форматів обміну даними, зокрема RDF, OWL та JSON-LD, що дозволяє інтегрувати її з різноманітними джерелами даних і робить застосування системи гнучким та масштабованим.

Подальший розвиток системи керування онтологіями на основі графової бази даних Neo4j спрямований на розробку ефективних алгоритмів зіставлення, об'єднання та інтеграції предметних онтологій.



а)

б)

Рис.1 – а) Інтеграція **Helianthus Ontology & Helianthus Phenotype& Sunflower Ontology** в Neo4j;

б) Інтерфейс користувача системи керування онтологіями в Neo4j.

Література

1. A. Bakurova, K. Vedmedeva, S. Vedmedev, E. Tereschenko, Ontological Model of Helianthus Cultivation in Ukrainian Conditions. In: CEUR Workshop Proceedings, 3396, 130–140, 2023.

COMBINATORIAL, EXPANDING PHASE SPACE OF COGNITIVE DYNAMIC SYSTEMS

Yurii Prokopchuk

*Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and SSA of
Ukraine*

Abstract. The paper discusses the features of phase spaces of cognitive dynamical systems. The most important features of phase spaces are their strong connectivity or generalized entanglement, constant and unpredictable change / combinatorial expansion, emergence of new holistic qualities, growth of cognitive complexity and unlimited multi-scale. Key aspects: “living structure”; nature of vagueness; sketch networks; multi-resolution descriptions; meaning of information; entanglement, wholeness, criticality; situational creative Space of possibilities; combinatorial/cognitive complexity; Causal Model of the World.

The approach is based on the Limiting Generalization Paradigm (LGP) [1], [2], [3]. Any image/situation/scene is described by an expanding network of sketches (Multi-resolution Descriptions / Representations; Self-Modelling Dynamics; Self-Reference System; Self-Improving Memory). Sketches come in varying degrees of roughness. Sketches can be generative, empirical, and external (external sketches are found in external resources or with other agents). It is necessary to combine into a whole multi-unity, infinity, competitiveness, complementarity (multi-physicality), multi-scale, dynamism, emotionality, purposefulness (Fundamental Structure of Knowledge and Information). Sketch networks (SN) are integrated into a “network of sketch networks” with increasing experience (“wholeness / cholarity” emerges). ‘Wholeness’ correlates with the psychological concept of ‘Cognitive Consistency’. This is the basis of a combinatorial, expanding phase space (PhSp) of autonomous systems (AS) and/or cognitive agents (CA): AS/CA/biological organisms as hierarchical dynamical systems that generate regularities in their multi-scale phase-spaces through interactions with their environment (multiscale landscape of potentialities: the ‘hidden’ structure of uncertainties that instantly actualize through interactions). Sketch networks come in different types, which flow into one another (The hidden

structure of Mind / consciousness). Examples: "cognitive numbers", "networks of distinction/discrimination tasks", "networks of image sketches", "networks of atomic sensations" (Sentient Systems), "spiritual networks of sketches" (all sketches are emotionally colored), "networks of thought flows" (for example, when solving distinction tasks). All sketch networks belong to the class of "living structures" (they are essentially connected with the circulation of internal energy). The 'living' LGP architecture (CogArch-LGP) is described by the "Body - Affectome - Connectome - Cognitome - Interactome" model (System 0/1/2/3).

The network of sketch networks together with assistants (they form sketches-interpretations; LGP Enhances Collective Intelligence) allows you to highlight the meaning of any information (the gist of the problem/situation; How People Cope with Uncertainty: uncertainty reduction becomes an act of understanding; Chaitin's 'compression is comprehension'). Sketch networks create meanings: Meaning as Wholeness Experienced (World-likeness); Thinking is the Operation of Meanings; Natural Intelligence is about Meaning; Meaning Generation as a Key Item for Artificial Intelligence; Systemic Theory of Meaning.

Different sketches may have different formalisms (multi-physicality, extended complementarity, Multi-Unity: Unity through Diversity). Entity/image/object sketches may contain a "Hierarchy of Spatial Belongings". The hierarchical relationships between Spatial Belongings can ensure the qualitative nature of components of perceptual organization, such as object, background, and detail. This contains the answer to an important question [4]: What is a mathematical structure of (conscious) experience? In defining a mathematical structure of (conscious) experience, our proposal (LGP) answer the question of what this mathematical structure actually is, or which type it has [2]. In cognitive architecture, all the laws of physics for living nature must work (the essence of "living structures"; Mathematics Becomes a Living Structure). The generation and circulation of internal energy plays a special role (sketch networks and inductors generate, receive and relay waves of activity/energy; phase transitions of different types: resonances, "ray of consciousness", concentration of energy/attention on one sketch - the basis of long-term planning and logical thinking). The growth of connectivity or generalized entanglement leads to the emergence of 'Integrity / Wholeness / World-likeness' (Globally Coupled Networks; 'Consciousness' emerges from the critical integration of distributed networks of sketches/neural assemblies: levels of activity and amounts of dynamic differentiation and integration in the system produce conscious experience; The system reaches the threshold required to be a consciously perceiving system). Following the principle of resource conservation, sketch networks

and the network of sketch networks as a whole tend to a critical state ('edge of chaos'; self-organized criticality). An example of the evolution/expansion of a sketch network is shown in Figure 1.

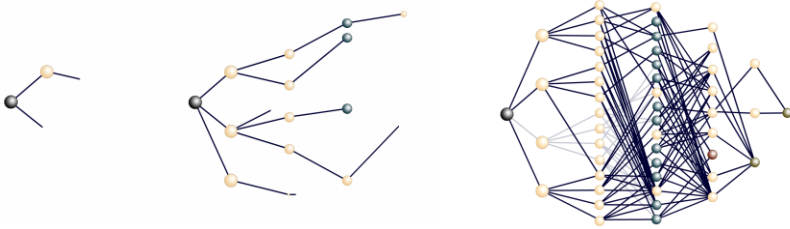


Fig. 1 - *An example of the evolution/expansion of a sketch network*

All variables/signals/parameters of the AS/CA are described by "cognitive numbers" (tests) and/or networks of distinction tasks (Cognitive mechanisms of the quantitative meaning construction; Cognitive Dynamic Systems in the State Space). A mathematical model of the meaning/gist of the signal / variable / parameter is proposed [1], [3]. The signal model is a "living structure". Figure 2 shows the stages of (fractal-like) differentiation/incubation in the ontogenesis of some value "a" of a test / signal / variable.

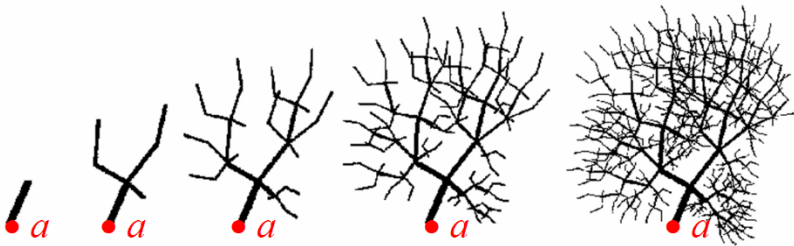


Fig. 2 - *The stages of differentiation/incubation of some value "a" of a test/signal*

Actualization "a" means a wave-like actualization of the vertices of the entire network of sketches. In the process of subjective inflation, the cog-number 'grows' as a living structure. Combining all the basic values of the test into a domain leads to the emergence of a network of distinction tasks. The essence of intellectual ontogenesis is the progressive differentiation of the initially undivided whole. This fact plays an important role in the combinatorial expansion of the phase space. The test bank in any distinction

task generates a categorization operator that allows one to implicitly find a “thin slice” (extremely generalized heuristics).

Vagueness plays an important role when considering the multi-scale PhSp of cognitive dynamic systems with different observation conditions and other types of uncertainty. Sketch networks provide an answer to the question: "What Vague Objects are Like?" LGP presents a new approach to the logic and semantics of vagueness (The Nature of Vagueness): The meaning is always vague; Sketches and traces of memory are blurry; Natural estimates of any parameters and characteristics are always vague; The event's echo or reward is always vague; Objects in the distance or in the background are always blurry; Initial design ideas and strategic plans are always vague; Emotions and mood are always a vague assessment; Vague Identity; Vague Objectives; Vague time, and vague location; Measurement error; The ambiguity and flexibility in commonsense reasoning; Fuzziness, uncertainty, and vagueness of spatiotemporal objects; Fuzzy relationships between vague spatiotemporal objects; Intuitionistic Fuzzy Similarity Measure; Incomplete Observations. Dynamic logic describes the movement from vagueness to precision (this concerns plans, trajectories, assessments).

The sketch network can be viewed as a quantum-like superposition of sketches (Quantum-like SN hypothesis). What is a proper mathematical structure for entities that are affected by the act of measurement? We consider SN as “observables” (i.e., entities that can, in principle, be observed) and “measurement outcomes” with probabilities that SN observables take particular values-sketches (quantum-like eigenstates). Quantum-like entanglement of sketch networks is a part of generalized entanglement (together with inductors-heuristics, stigmergy and remote synchronization of oscillators on sketch networks; extended complementarity; Quantum-like interference as a general principle governing human/agents decision making; The intersection of quantum-like theory and cognitive science, covering new insights, modelling techniques, and applications for understanding human/agents cognition and decision making). We propose a formal framework for understanding and unifying the concept of observers across physics, computer/cognitive science, (second-order) cybernetics, philosophy, and related fields (Towards a Generalized Theory of Observers: Developing a LGP-Model for Observers/CA; From Observer to Agent). Advanced AI can overcome fundamental limitations of the "logic of living systems" (Evolution greatly limits the scope of potential design principles).

Some fragments of the sketch networks provide a connection between cognitive and symbolic structures (with the help of "cogs"), which ensures the transition to symbolic space, language and logic (together with the inductor space containing implicit/explicit inference schemes). Signs

(language) simplify communication between AS/CA (methods that are specially devised to explore correlations between cognitive and language structures, mental and linguistic formats of knowledge).

The level of development of the network of sketch networks (mental sphere) determines the cognitive complexity of the agent. People/CA with higher levels of cognitive complexity endure crisis situations and loads more easily and find their way out of them more quickly. The transition to extreme generalization determines ease and aesthetic satisfaction in solving professional problems of distinction, developing a “critical sense” or the desire for perfection in all aspects of activity (Optimal cognitive complexity: the “edge of chaos”: critical sketches, “thin slice” heuristics in distinction tasks; Heuristics for the Undecidable; Epistemology of Self-organization). Criticality acts as one of the fundamental natural mechanisms of the universal creative process – the desire for beauty, perfection. The ability to generalize develops strategic thinking.

The network of sketch networks is a conceptual metaphor or rough sketch of the CA Mind (mental sphere). Perhaps some multi-physical sketch networks can serve as a metaphor for qualia (“The feeling of qualia is the result of an efficient compression of information about prior experiences” ([5]). Qualia (in the LGP interpretation) is a coordinate system of high-level sketches that can be consciously understood (Mathematical framework for qualia structures). How are narrower qualia combined into broader qualia? What is the mechanism by which phenomenal unity is achieved? The answers to these questions are provided by the LGP (Meaning as Wholeness Experienced; Cognitive Consistency). Multiple descriptions-sketches of an image, phenomenon, trajectories or situation exist simultaneously. There is an inseparable superposition of sketches of different levels of generalization (Scale-Entwined Systems; Coordination Across Scales: Cascade of Interactions). Figure 3 shows different scale qualia systems for different PhSp sketches.

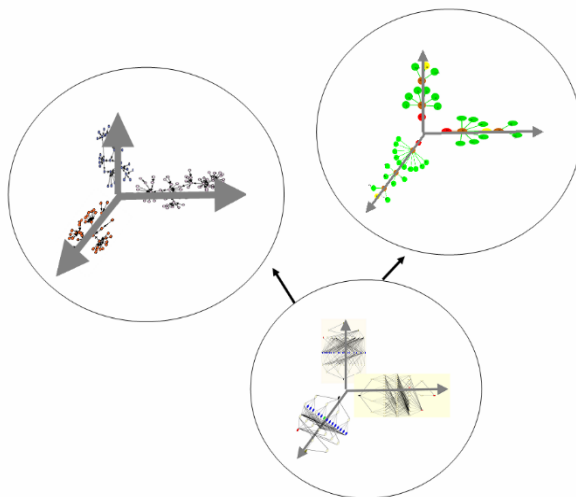


Fig. 3 - *Different scale qualia systems for different PhSp sketches*

The most important features of phase spaces of cognitive systems are their strong connectivity or generalized entanglement, constant and unpredictable change/expansion, the emergence of new holistic qualities (abrupt growth of cognitive complexity), and unlimited multi-scale. The agent's control system continuously improves itself (Proto-Cognitive Bases of Agency; Instability, uncertainty, complexity, non-monotonicity of inference, "controlled hallucination", intuition and ambiguity are typical characteristics of the state/behavior of the cognitive system; Limits of Recursive Self-improvements; Principle of parsimony; Reformulation & Serendipitous Discovery; Transformative Experiences of the Possible – experiences grounded in the continuous interplay between enhanced sense of the possible, personal agency, and the enactment of new possibilities). Uncertainty becomes not a problem but a core operating principle. This view of the agent's development, dynamics/behavior makes traditional optimization impossible.

We will describe CA observations using triplet-events ("mental molecules"): $Ev = \langle P, \{Q\}, \varepsilon \rangle$, where P is a sketch of an image; $\{Q\}$ is a set of sketches of a context (also contains sketches of space); ε is a sketch of an internal state (emotion). Any action-thoughts f creates a flow of events $\{Ev\}_f$ ↑ or local "arrow of time" ("mental supra-molecules", "supramolecular mental complexes"; The metaphor of the "double helix of action-thoughts "). All local "arrows of time" form "Subjective Space-Time-Actions" (SSTA).

Local "arrows of Time" connects sketches from different sketch networks. Each SSTA "mental molecule" (event) consists of three/four oscillating (quantum) cones or vortices generated by sketch networks. The fourth "cone" corresponds to the pattern/action-thoughts and symbolizes the context (the core of the chain of actions/thoughts/goals). SSTA is the foundation of strong connectivity (entanglement) in the mental sphere as well as subjective experience (The Scene Perception & Event Comprehension Theory; Philosophy of Time and the Temporal Structure of Perceptual Experience; Perceptual Experience of Space; Spatial Senses). All SSTA entities form their own sketch networks. Based on SSTA, causal patterns of different scales are implicitly defined, which enhances coherence / integrity / intuition ('Distillation' Mechanism: distilling patterns-of-patterns). SSTA is an integral part of the phase spaces. The "Narrative Space" functions in a similar way. It significantly enhances the coherence of the mental sphere (What is the structure of a grounded world model? A Mathematical Theory of Knowledge for Intelligent Agents; Wholeness and the Implicate Order: A Fundamental Organizational Principle of the Mind). The internal implicit categorization of heuristics in distinction tasks leads to the emergence of an "Inductor Space" (a set of heuristics of varying degrees of generalization together with creative spaces of possibilities; Insight-seeking).

Patterns/action-thoughts/movements are described by schemes $f/\mu: \{a\} \rightarrow \{b\}$, where $\{a\}, \{b\}$ are the properties of the initial and final situations; μ are the mechanisms for executing patterns belonging to the situational creative Space of possibilities $\text{Pos-Space}_t(f)$ [6]. Agentive behavior involves a continuous creative act ("Going Beyond" / "Out of bounds"; Producing Endless Novelty; Models of Possibilities Instead of Logic as the Basis of Human Reasoning: A New Framework for Adaptation of "Living Systems"; Spontaneous Potentiality; Heinz von Foerster's operational epistemology: "Act in such a way as to multiply the number of opportunities for choice!"):

$$\forall t \forall f \quad |\text{Pos-Space}_t(f)| \rightarrow \text{Creative Max}$$

The problem is that it is impossible to fully formalize the Creative Max agentive operator (Limits of Mathematical Modeling of Affordances). The spaces of possibilities of patterns are fundamentally indeterminate [7]. The task of choosing from spaces of possibilities is uncomputable. Meaning arises from our physical interaction with the environment (agents must be capable of engaging autonomously in causal physics discovery; the dynamics of the system "brain-body-landscape of affordances"). The authors of [8] believe that the "reasonable inefficiency" of mathematics in biology is an invitation

to push the boundaries of science and see that the creative potential of nature goes beyond strict mathematical formalism.

The “continuum of tasks” distinction scheme with cognitive penetration implements a dynamic competitive mechanism of instant decision-making, the task of which is to ensure survival in an aggressive and uncertain environment. It is the use of embodied “thin slice” heuristics that has a significant impact on the speed and economy of the decision-making process (The Principle of Super-efficiency, suggesting that collective behaviours self-organise to the critical regime where optimal efficiency is achieved [3]). Direction where the approach can be used [9].

References

1. Prokopchuk Y. (2022). Intuition: The Experience of Formal Research. Dnipro, Ukraine : PSACEA Press. (in RU)
2. Prokopchuk Y. (2025). Some topical issues of formalization of cognitive science. Proceedings of the Scientific and Practical Conference «Information Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM 2025». Dnipro, Ukraine: Ukrainian State University of Science and Technologies. Pp. 377 - 383. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.067
3. Prokopchuk, Y. (2025). Designing Ecosystems of Intelligence: Logic of Fast Distinction. Materials of the 17th international scientific and practical conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT-2025)» (May 28-30, 2025, Odesa). Odesa: Kherson State Maritime Academy. Pp. 29 – 34.
4. Kleiner, J., Ludwig, T. (2024). What is a mathematical structure of conscious experience?. Synthese. 203(3). 10.1007/s11229-024-04503-4.
5. Jost, J. (2021). Information theory and consciousness. Front. Appl. Math. Stat., 7, 641239.
6. Prokopchuk Y. (2024). Sketch of the Autonomous/Cognitive System Behavior Model. Automatics 2024: Abstracts of the XXVII International Conference of Automatic Control, Dnipro, November, 20-22, 2024. Dnipro: DNU. Pp. 176 – 177.
7. Prokopchuk Y., Nosov P., Ben A. (2024). Problems of Meaning, Understanding, Computability and Adaptability in Artificial Cognitive Systems. Proceedings of the 16th Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT-2024)» (May 29-30, 2024, Odesa). Odesa, Ukraine: Kherson State Maritime Academy. Pp. 19 – 25.
8. Garte, S., Marshall, P., Kauffman, S. (2025). The Reasonable Ineffectiveness of Mathematics in the Biological Sciences. Entropy. 27. 280. 10.3390/e27030280.

9. Ponomaryova, V., Nosov, P., Ben, A., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Dudchenko, S., Appazov, E., Sokol, I. (2024). Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (127)), 6–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296955>

**ДИСБАЛАНС ЗБУДЖЕННЯ/ГАЛЬМУВАННЯ ЯК
НЕЙРОБІОЛОГІЧНИЙ МАРКЕР У СПЕКТРІ ПСИХОЗІВ ТА
АУТИЗМУ: ВИСНОВКИ НА ОСНОВІ НЕЙРОВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ**

Терницький В.М., Широкоград Д.В.³

Національний університет «Запорізька політехніка»

**EXCITATION/INHIBITION IMBALANCE AS A
NEUROBIOLOGICAL MARKER IN THE PSYCHOSIS AND
AUTISM SPECTRUM: CONCLUSIONS BASED ON
NEUROIMAGING AND COMPUTATIONAL MODELS**

Ternytskyi V.M., Shyrokorad D.V.

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. The present study supports the idea that quantitative brain measures, particularly those that reflect functional dynamics, may be critical for distinguishing disorders with behavioral features. The results underscore the biological continuity between psychotic disorders and emphasize the need to incorporate dimensional or biologically based classifications into diagnostic processes.

Диференціація та розуміння психічних розладів, таких як шизофренія (SZ), біполярний розлад (BD) та розлад аутистичного спектру (ASD), залишаються складними через перекривання клінічних симптомів та спільні генетичні та нейробіологічні особливості.

Традиційні діагностичні системи, такі як DSM-5, все частіше стикаються з проблемою відсутності біологічної специфічності. Це спонукало дослідників до вивчення проміжних фенотипів та біомаркерів, які виходять за межі діагностичних кордонів.

Одним із перспективних напрямків є баланс збудження/гальмування (Е/І) у мозку — фундаментальна нейрофізіологічна властивість, що впливає на синаптичну обробку та динаміку нейронних мереж.

У розладах аутистичного спектру (ASD) ранні гіпотези припускали, що підвищене збудження кори головного мозку, можливо, внаслідок зменшення гамма-аміномасляної кислоти (ГАМК) інгібування, сприяє сенсорній гіперчутливості та змінній обробці інформації, що спостерігається у осіб з аутизмом [1]. Ця точка зору була підтверджена даними посмертних досліджень мозку (наприклад, зниженою експресією ферменту GAD65/67), моделями на тваринах та дослідженнями магнітно-резонансної спектроскопії, які показали змину концентрацій ГАМК та глутамату.

Тракошіс та ін. [2] вдосконалили цей напрямок досліджень, використовуючи показник Херста для індексації дисбалансу Е/І у осіб з аутизмом, і виявили специфічні для статі ефекти у функціонуванні медіальної префронтальної кори. Їхня робота свідчить про те, що співвідношення Е/І не тільки підвищене при ASD, але й може відрізнитися залежно від статі та ділянки мозку.

При шизофренії (SZ) спостерігаються подібні порушення Е/І, які часто супроводжуються гіпофункцією NMDA-рецепторів та дефіцитом парвальбумін-позитивних ГАМК-ергічних інтернейронів [3]. Вважається, що ці зміни сприяють гіперконнективності на рівні мережі, порушенню робочої пам'яті та виникненню психотичних симптомів, таких як галюцинації та марення.

Йардрі та ін. [4] підкреслили зв'язок між дисбалансом Е/І та аномальною внутрішньою сенсорною обробкою при SZ, припускаючи, що порушення співвідношення Е/І може лежати в основі спотвореного сприйняття реальності, характерного для цього розладу.

Генетичні дослідження додатково підтверджують спільні біологічні основи ASD та SZ.

Гао та Пензес [5] проаналізували збіжні дані про те, що порушення синаптичних білків, залучених до балансу Е/І (наприклад, SHANK, NRXN, NLGN), мають відношення до обох розладів, що свідчить про те, що спільні генетичні фактори ризику можуть проявлятися через подібні нейронні механізми.

Канітано і Паллагрозі [6] висунули гіпотезу, що дисбаланс Е/І є трансдіагностичним виміром нейророзвитку патології, що потенційно пояснює перекривання симптомів, таких як соціальна ізоляція, сенсорна дисфункція та емоційна дизрегуляція.

Дослідження Ускатеску та ін. [7] було зосереджено на співвідношенні збудження/гальмування (Е/І), яке було кількісно оцінено за допомогою експоненти Херста на основі фМРТ у стані спокою, порівнюючи учасників з нейротиповою контрольною групою, ASD та SZ. Автори застосували алгоритм машинного навчання «Оптимальне класифікаційне дерево» (ОСТ), використовуючи комбінації клінічних, фенотипних та візуалізаційних характеристик.

Було використано п'ять інкрементальних моделей, що склалися з різних комбінацій клінічних, фенотипних та нейровізуальних ознак. Центральним елементом їхнього нейровізуального аналізу був показник Херста (H), безмасштабна метрика, отримана з часових рядів фМРТ у стані спокою, яка використовувалася для апроксимації балансу збудження/гальмування (Е/І) у 53 незалежних компонентах мозку, визначених шаблоном NeuroMark ICA.

Експонента Херста кількісно оцінює довгострокові часові кореляції коливань сигналу BOLD, причому нижчі значення H вказують на вищий коефіцієнт Е/І, що свідчить про більшу домінантність збудження. Ці значення H були включені або окремо, або в поєднанні з клінічними показниками (наприклад, PANSS, ADOS) та фенотипними змінними (наприклад, IQ, коефіцієнт емпатії, алекситимія) у всіх моделях. Ефективність класифікації покращилася з включенням H, а найвища точність (85%) була досягнута при поєднанні всіх трьох типів даних.

Класифікаційні моделі, що використовують значення H (маркери Е/І), перевершили моделі, засновані виключно на клінічних або фенотипних даних.

Рейтинг важливості ознак показав, що кілька компонентів мозку, отриманих за допомогою H, були серед найвпливовіших предикторів для розрізнення ASD від SZ.

Дисбаланс Е/І: як група з ASD, так і група з SZ показали підвищені співвідношення Е/І порівняно з контрольною групою, причому група з SZ показала більш значний дисбаланс.

Це дослідження підтверджує думку, що кількісні показники мозку, особливо ті, що відображають функціональну динаміку, можуть бути критично важливими для розрізнення розладів із поведінковими ознаками.

Хоча дисбаланс Е/І є багатообіцяючим трансдіагностичним маркером, більш широкі дослідницькі ініціативи, такі як дослідження BSNIP [8], мають на меті виявити ширший спектр нейробиологічних ознак у всьому спектрі психозів, надаючи важливий контекст і

додаткові дані, що підтримують перехід до біологічно обґрунтованих систем класифікації.

Дане дослідження є масштабною спробою вивчити спільні та відмінні біологічні особливості шизофренії (SZ), шизоафективного розладу (SAD) та біполярного розладу з психозом (BDP). У ньому оцінювався ряд біомаркерів, включаючи когнітивні функції, контроль руху очей, показники ЕЕГ, структурну та функціональну МРТ і DTI.

Спільні порушення: когнітивні дисфункції та електрофізіологічні аномалії були очевидними у всіх групах пацієнтів із психозами, що свідчить про спільну патофізіологію.

Структурні відмінності мозку: зменшення сірої речовини було більш вираженим у пацієнтів із SZ та SAD, ніж у пацієнтів із BDP. Примітно, що структурні профілі пацієнтів із BDP були ближчими до контрольної групи.

Зв'язність та біла речовина: DTI та фМРТ у стані спокою виявили порушення зв'язності як у SZ, так і в BDP, хоча і в різному ступені.

Ці результати підкреслили біологічну спадкоємність між психотичними розладами, визначеними DSM, та наголосили на необхідності включення розмірних або біологічно обґрунтованих класифікацій в процеси діагностики.

Висновки. Новітні дослідження вказують на дисбаланс збудження/гальмування (Е/І) як ключовий нейрофізіологічний механізм, що лежить в основі як розладу аутистичного спектру (ASD), так і шизофренії (SZ). Дослідження з використанням передових методів нейровізуалізації та обчислювальних методів демонструють, що оцінки співвідношення Е/І можуть ефективно розрізняти ці клінічні розлади, пропонуючи перспективний трансдіагностичний біомаркер.

На додаток до цього, дослідження BSNIP підкреслює більш широку необхідність виходу за межі традиційних діагностичних категорій шляхом виявлення спільних і відмінних біологічних рис у всьому спектрі психозів. Разом ці висновки підтримують зміну парадигми в бік біологічно обґрунтованих моделей психіатричної класифікації, де співвідношення Е/І виявляється особливо цінним показником для розуміння та діагностики складних неврологічних та психотичних станів.

Література

1. Rubenstein JL, Merzenich MM. Model of autism: increased ratio of excitation/inhibition in key neural systems. *Genes Brain Behav.* 2003

Oct;2(5):255-67. Doi: 10.1034/j.1601-183x.2003.00037.x. PMID: 14606691; PMCID: PMC6748642.

2. Trakoshis S, Martínez-Cañada P, Rocchi F, Canella C, You W, Chakrabarti B, Ruigrok AN, Bullmore ET, Suckling J, Markicevic M, Zerbi V; MRC AIMS Consortium; Baron-Cohen S, Gozzi A, Lai MC, Panzeri S, Lombardo MV. Intrinsic excitation-inhibition imbalance affects medial prefrontal cortex differently in autistic men versus women. *Elife*. 2020 Aug 4;9:e55684. Doi: 10.7554/eLife.55684. PMID: 32746967; PMCID: PMC7402681.

3. Anticevic A, Lisman J. How Can Global Alteration of Excitation/Inhibition Balance Lead to the Local Dysfunctions That Underlie Schizophrenia? *Biol Psychiatry*. 2017 May 15;81(10):818-820. Doi: 10.1016/j.biopsych.2016.12.006. Epub 2017 Jan 4. PMID: 28063469.

4. Jardri R, Hugdahl K, Hughes M, Brunelin J, Waters F, Alderson-Day B, Smailes D, Sterzer P, Corlett PR, Leptourgos P, Debbané M, Cachia A, Denève S. Are Hallucinations Due to an Imbalance Between Excitatory and Inhibitory Influences on the Brain? *Schizophr Bull*. 2016 Sep;42(5):1124-34. doi: 10.1093/schbul/sbw075. Epub 2016 Jun 3. PMID: 27261492; PMCID: PMC4988749.

5. Gao R, Penzes P. Common mechanisms of excitatory and inhibitory imbalance in schizophrenia and autism spectrum disorders. *Curr Mol Med*. 2015;15(2):146-67. doi: 10.2174/1566524015666150303003028. PMID: 25732149; PMCID: PMC4721588.

6. Canitano R, Pallagrosi M. Autism Spectrum Disorders and Schizophrenia Spectrum Disorders: Excitation/Inhibition Imbalance and Developmental Trajectories. *Front Psychiatry*. 2017 May 1;8:69. doi: 10.3389/fpsy.2017.00069. PMID: 28507523; PMCID: PMC5410649.

7. Uscatescu, L., Hyatt, C., Kronbichler, M., Calhoun, V., Corbera, S., Pelphrey, K., Pittman, B., Pearson, G., & Assaf, M. (2022). P495. Using Excitation/Inhibition Ratio to optimize the classification of autism spectrum disorder and schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 91(9), S288–S289. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2022.02.730>

8. Tamminga CA, Pearson G, Keshavan M, Sweeney J, Clementz B, Thaker G. Bipolar and schizophrenia network for intermediate phenotypes: outcomes across the psychosis continuum. *Schizophr Bull*. 2014 Mar;40 Suppl 2(Suppl 2):S131-7. doi: 10.1093/schbul/sbt179. PMID: 24562492; PMCID: PMC3934403.

**ВИЯВЛЕННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ ДІЙ ТА АТАК У
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ
АНСАМБЛЮ МОДЕЛЕЙ**

Третяк О.О., Дубровін В. І.

Національний університет "Запорізька Політехніка"

**DETECTION OF UNAUTHORIZED ACTIONS AND ATTACKS
IN COMPUTER NETWORKS USING ENSEMBLE MODELS**

Tretiak O.O., Dubrovin V.I.

National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

Abstract. *Ensemble learning techniques are applied to detect unauthorized activities and cyberattacks in computer networks. By combining multiple machine learning models—such as bagging, boosting, and stacking—these approaches enhance detection accuracy and reduce false positives. The integration of deep learning architectures and feature fusion mechanisms significantly improves the performance of intrusion detection systems (IDS). Leveraging multivariate anomaly detection and adaptive ensemble frameworks enables robust, real-time identification of complex cybersecurity threats.*

Keywords: ensemble learning, anomaly detection, intrusion detection systems, network traffic, machine learning, false positive reduction

Постановка проблеми. Відомі мережеві аномалії настільки різноманітні, що їх не можна категоризувати за допомогою однієї простої класифікації. Швидко зростає кількість атак, їх потужність та складність. Зловмисники шукають принципово нові методи незаконних втручань на мережу і дуже часто існуючі засоби захисту виявляються безсилими перед ними.

Світові лідери з інформаційної безпеки ставлять необхідність виявлення DDoS-атак і протистояння їм як першочергове завдання в своїх дослідженнях і розробках. На даний час не існує якогось універсального засобу для протидії несанкціонованим вторгненням. Більшість методів мають обмеження в застосуванні до нестационарних сигналів.

Методи виявлення мережевих атак. Методи виявлення мережевих атак поділяються на методи виявлення аномалій та методи виявлення зловживань. Сигнатурні методи орієнтовані на виявлення вже відомих атак за заздалегідь заданими шаблонами. Вони ефективні

при наявності точних сигнатур, але не здатні виявляти нові чи модифіковані загрози.

Методи виявлення аномалій базуються на виявленні відхилень від нормальної поведінки системи. До таких методів належать поведінкові, які порівнюють поточну мережеву активність з профілем нормальної роботи. Значні відхилення можуть свідчити про потенційну атаку. Ці методи дозволяють виявляти нові загрози, однак схильні до хибнопозитивних спрацювань, особливо в динамічних умовах. Для налаштування таких систем необхідний етап навчання, що триває певний час.

До поведінкових методів [1] належать: вейвлет-аналіз, статистичний, ентропійний, спектральний, фрактальний та кластерний аналіз. Також використовуються багатовимірні підходи, які враховують одночасно кілька параметрів — частоту запитів, кількість з'єднань, розмір пакетів тощо.

Сучасним підходом є ансамблеві моделі, що поєднують декілька алгоритмів машинного навчання. Вони враховують як поведінкові, так і статистичні характеристики трафіку, що забезпечує гнучкість, адаптивність та ефективність у виявленні складних атак.

Метод ансамблевого навчання. Однією з перспективних технологій аналізу даних є ансамблеве навчання, інструменти якого знаходять застосування у різних галузях інтелектуальної діяльності, зокрема в сфері мережевої безпеки та Інтернету речей [2]. Традиційні методи виявлення аномалій, що базуються на одиничних алгоритмах машинного навчання, часто не справляються з виявленням складних або нових атак, зокрема через високий рівень хибнопозитивних спрацювань і низьку здатність до узагальнення [3].

Ансамблеві методи дозволяють поєднувати декілька моделей — як однорідних (одного типу), так і різнорідних (різного типу) — для покращення точності, стійкості до шумів та здатності до адаптації до змін структури даних у часі (concept drift) [2][3]. Вони демонструють значно вищу ефективність при виявленні атак у потокових даних, дозволяючи не лише покращити точність, але й забезпечити реальночасне виявлення загроз за умов обмежених ресурсів обчислення [2]. Однією з актуальних задач при використанні ансамблевого підходу є вибір конкретних базових моделей та механізм їх об'єднання — голосування, баггінг, бустинг або стекінг. Цей вибір часто ґрунтується на емпіричному досвіді дослідника і потребує окремого етапу оцінювання [3].

Виявлення аномалій за допомогою ансамблевих моделей. На практиці для аналізу мережевого трафіку застосовуються як класичні ансамблі на основі дерев рішень (наприклад, Random Forest[4], Adaptive Random Forest), так і більш складні гібридні ансамблі, що включають, наприклад, SVM, нейронні мережі, або методи глибокого навчання (CNN-LSTM, CNN-GRU) [2], [5].

Серед вхідних даних, що аналізуються такими системами, можуть бути як традиційні мережеві ознаки (кількість з'єднань, розмір пакетів, протоколи), так і високорівневі статистичні або часові характеристики [3].

Зазвичай у процесі моделювання сигнал розділяється на компоненти, відповідні короткостроковим сплескам (які можуть бути шумом або атаками типу DoS), середньочасовим коливанням (наприклад, зміни, спричинені користувацькою активністю) та довготривалим тенденціям (APT-атаки, витік даних) [3]. У випадку використання потокового аналізу застосовується онлайн-навчання, а моделі адаптуються до змін у даних. Особливу увагу дослідники приділяють здатності систем виявляти concept drift — поступові або різкі зміни в розподілі даних, що можуть сигналізувати про зміну типу загроз [2].

Процедура виявлення аномалії передбачає попередню обробку трафіку (нормалізація, вибір ознак), обчислення предикторів в ковзному вікні та застосування порогового аналізу. Подія вважається аномальною, якщо відповідна метрика перевищує встановлене порогове значення, що було визначене на етапі навчання або оптимізації [3].

Висновки. Ансамблеве навчання є одним із найефективніших сучасних підходів до виявлення несанкціонованих дій у мережах. Його перевага полягає у здатності поєднувати переваги кількох алгоритмів машинного або глибокого навчання для досягнення високої точності та стійкості до змін вхідних даних. На відміну від класичних сигнатурних або одиночних моделей, ансамблі здатні виявляти як вже відомі, так і нові типи атак, зокрема в умовах змінного або потокового трафіку.

Запропоновані підходи на основі баггінгу, бустингу та стекінгу дають змогу знизити рівень хибнопозитивних спрацювань, адаптуватися до концептуальних змін у даних (concept drift), а також аналізувати як короточасні сплески активності (наприклад, DoS), так і довготривалі загрози (APT-атаки).

Таким чином, поведінкові методи, зокрема ансамблеві моделі, є перспективним напрямом для створення адаптивних систем захисту,

здатних ефективно функціонувати в умовах складного, гетерогенного та динамічного мережевого середовища.

Література:

1. Дубровін В.І. Поведінкові методи виявлення несанкціонованих дій та атак в мережах / В. І. Горобець, В. І. Дубровін, Ю.В. Твердохліб // Матеріали XXIII Міжнародного науково-практичного семінару імені А.Я. Петренюка. – Запоріжжя – Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем, 2021. – С. 60-64.
2. Buczak A. L., Guven E. A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection // *Information*. 2020. Vol. 11(6). Article 315.
3. Gill H., Shafiq M. Z., Jalil Z., et al. Feature Engineering for Ensemble-Based IDS // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(24). Article 13310.
4. Сташук Денис. Випадковий ліс : пошук аномалій у комп'ютерних мережах / Денис Сташук, Валерій Дубровін, Юлія Тарасова // Матеріали 25-го Міжнародного науково-практичного семінару імені А.Я. Петренюка "Комбінаторні конфігурації та їхні застосування" (14-16 червня 2023 року, м. Запоріжжя) / Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ <<Запорізька політехніка>>, 2023. – С. 190-195. – електрон.оптичний диск (DVD-ROM).
5. Behal S., Kumar M., Singh S., et al. IoT Intrusion Detection Using Ensemble Deep Learning Models // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(21). Article 11985.

РЕЗОЛЮЦІЯ
XXVII Міжнародного науково-практичного семінару
"КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ ТА ЇХНІ ЗАСТОСУВАННЯ"
присвяченого 125-річчю НУ «Запорізька політехніка»

Учасники XXVII Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», організованого за підтримки Міністерства освіти і науки України, Національним університетом «Запорізька політехніка» (кафедрою системного аналізу та обчислювальної математики), Центральнотериторіальним національним технічним університетом (кафедра вищої математики та фізики), за підтримки Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, представили 23 навчальних заклади і наукових установ України та 11 іноземних.

В семінарі брали участь представники від вищих навчальних закладів та наукових установ України:

1. Національний університет «Запорізька політехніка»
2. Центральнотериторіальний національний технічний університет
3. Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
4. Ужгородський національний університет
5. Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті
6. Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
7. Запорізький національний університет
8. Інститут інформаційних технологій і систем НАН України
9. Інститут енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного НАН України
10. Київський національний університет імені Тараса Шевченка
11. Українська державна льотна академія
12. Національний авіаційний університет
13. Національний університет водного господарства та природокористування
14. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
15. Національний університет «Львівська політехніка»
16. Харківський національний університет міського господарства імені О.Бекетова
17. Міжнародний Європейський університет
18. Черкаський державний технологічний університет, Черкаси
19. Інститут технічної механіки НАН України та Державне космічне агентство України

20. ПАТ “Науково-виробниче підприємство “Радій”, м. Кропивницький
21. Громадська організація «Системні дослідження»
22. Українське фізичне товариство
23. Громадська організація «Міжнародний дослідний центр вихрової енергетики» (МДЦВЕ).

Іноземні учасники представляли навчальні заклади і установи з восьми країн світу:

1. Університет Стоні-Брук, США;
2. Університет Делаверу, США;
3. Школа математики і статистики університету Сент-Ендрюс, Об'єднане королівство;
4. Школа комп'ютерних наук, Університет Сент-Ендрюс, Об'єднане королівство;
5. Університет Кардіффу, Об'єднане королівство;
6. Університет Гронінгена, Нідерланди;
7. Самаркандський філіал Ташкентського університету інформаційних технологій, Узбекистан;
8. Університет Мальти, Мальта;
9. ENGINEERING Ingegneria Informatica S.p.A., Roma, Italia;
10. Мадридський політехнічний університет, Іспанія;
11. Інститут математики Лодзьського політехнічного університету, Польща.

Науковці розглянули найбільш актуальні питання для розвитку української науки і економіки, що пов'язані з теоретичними та прикладними аспектами наукового напрямку «комбінаторні конфігурації» та його застосуваннями до вирішення сучасних проблем моделювання і прийняття рішень в управлінні складними системами за такими напрямками:

1. Комбінаторні конфігурації, графи та задачі оптимізації на них.
2. Автомати, скінчені алгебри, математична логіка і теорія множин, теорія ігор і теорія прийняття рішень, кодування та розпізнавання образів, їх застосування в різних галузях.
3. Математичні моделі дискретних процесів і систем різного призначення.
4. Програмне забезпечення синтезу та аналізу комбінаторних конфігурацій.
5. Графи знань, онтології, машинне навчання, графові бази даних, штучний інтелект.

6. Історія розвитку української науки.

Учасники конференції обговорили такі проблемні питання:

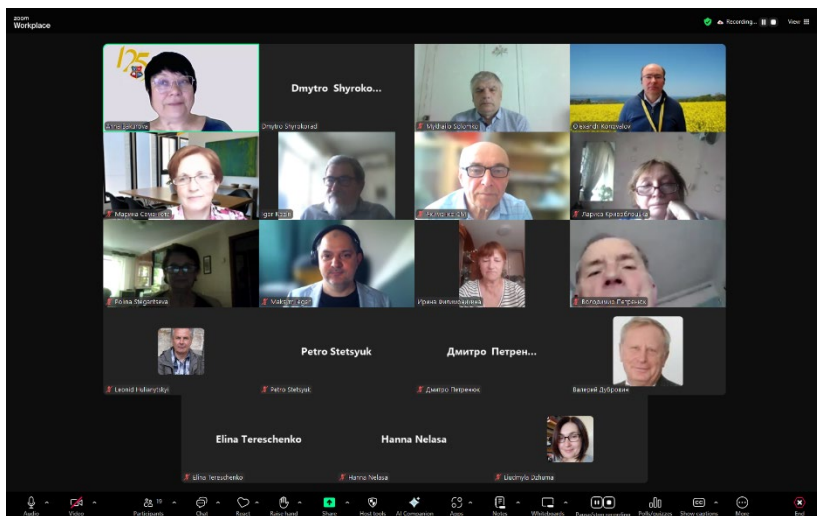
- введення нових типів комбінаторних конфігурацій;
- алгоритмічного підходу до навігації рою БПЛА;
- розв'язання задач маршрутизації транспортних засобів, зокрема задачі комівояжера з багатьма розв'язками, фрагментарні моделі для задач покриття, математичні моделі руху автономних груп агентів;
- нечіткі моделі в маркетингу послуг;
- використання солвера BARON для знаходження оптимальної упаковки;
- багатокритеріальна задача ефективності дуальної системи навчання для закладів вищої освіти;
- комбінаторний, розширюваний фазовий простір когнітивних динамічних систем;
- ряд результатів, присвячених теорії графів: факторизації повного графу, планарні графи, розмітки узагальненого графа Петерсена, розмітки для порогових графів, демонстрація роботи з графами у системі комп'ютерної алгебри GAP, графові моделі для побудови сильної команди, моделювання гри на регулярному графі, задачі побудови графів та їх груп;
- спрощення симетричних булевих функцій методом образних перетворень;
- питання застосування штучного інтелекту в ансамблі з комбінаторними конфігураціями: еволюція топології нейромереж, що керують поведінкою цифрових істот; програмування обмежень; екологічний моніторинг; нейробіологічний маркер на основі нейровізуалізації та обчислювальних моделей;
- проблеми побудови онтологій: онтології фенотипічних ознак соняшника; система керування онтологіями на основі графових баз даних;
- група питань, присвячених кібербезпеці: застосування вейвлет-аналізу для валідації даних у системах оцінки ризиків; оцінки ризику аномальної поведінки суб'єктів у IT-інфраструктурах; виявлення аномалій на базі федеративного навчання; виявлення несанкціонованих дій та атак у комп'ютерних мережах з використанням ансамблю моделей;
- проблеми інформаційного забезпечення цивільної авіації;

- проблеми обробки ретроспективних даних;
- комбінаторна оптимізація та її характерні особливості.

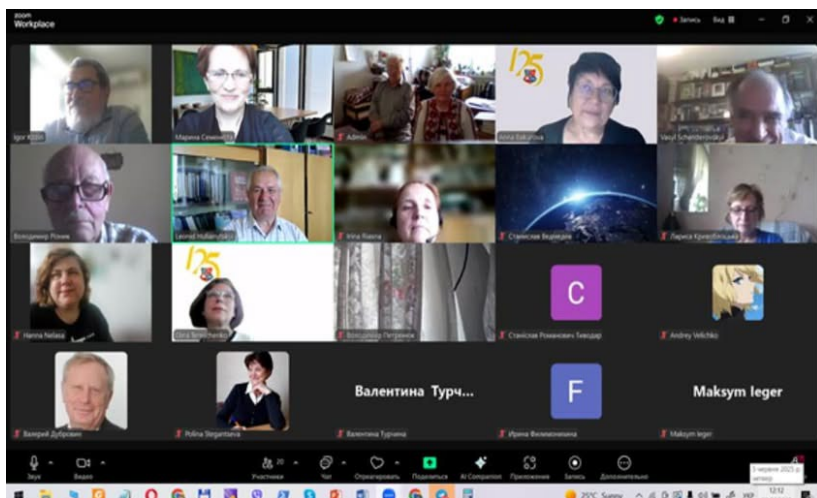
Усвідомлюючи роль і значення розвитку фундаментальних і прикладних досліджень, де широко використовуються комбінаторні конфігурації, учасники семінару вважають за необхідне:

1. Продовжити наукові дослідження за обраними напрямками, враховуючи зростаючу актуальність цієї тематики. Відзначивши високу ефективність дистанційної форми проведення XXVII Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», рекомендувати в майбутньому поєднувати дистанційну форму роботи семінару разом з традиційною очною присутністю (за можливістю).
2. Розвивати наукові зв'язки з вітчизняними та закордонними провідними вищими навчальними закладами та науковими установами для організації і реалізації спільних наукових та освітніх проєктів.
3. Готувати інформаційні матеріали українською та англійською мовою.
4. Підтримувати залучення молоді до участі в семінарі.
5. Рекомендувати кращі доповіді семінару до публікації в збірнику наукових праць «Кібернетика та комп'ютерні технології».
6. Розмістити інформацію про семінар та опублікувати резолюцію і збірник матеріалів на сайтах Центральноукраїнського національного технічного університету та Національного університету «Запорізька політехніка».
7. Поширювати інформацію про результати семінару у спеціалізованих виданнях

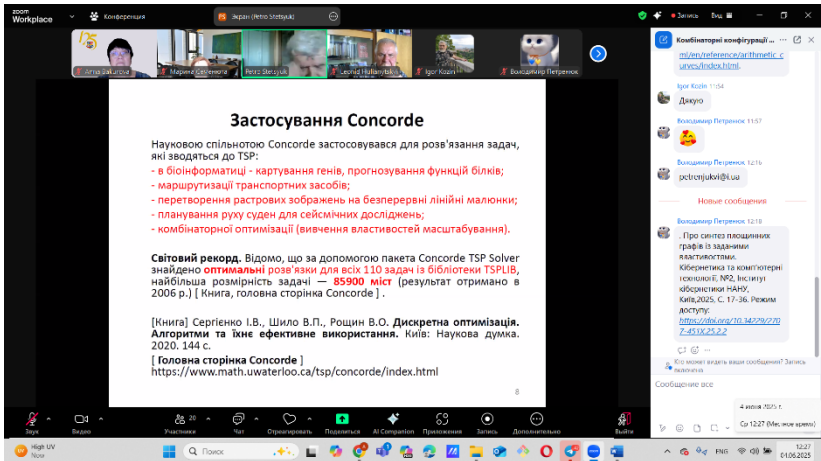
ФОТОМАТЕРІАЛИ



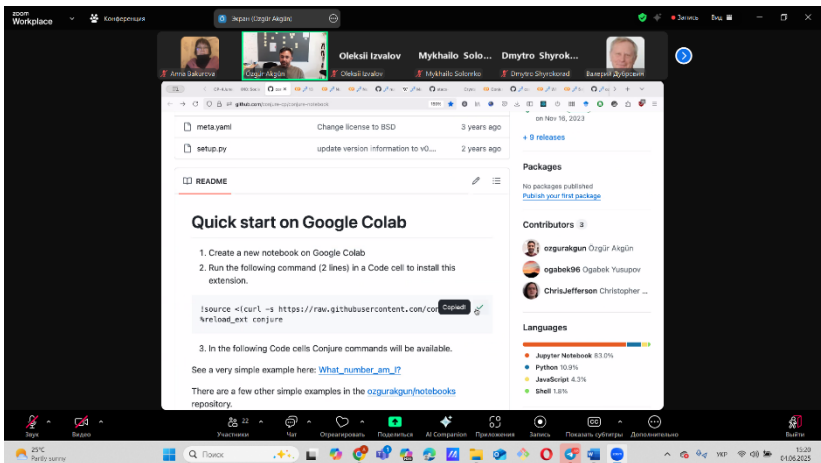
Відкриття семінару 04.06.2025



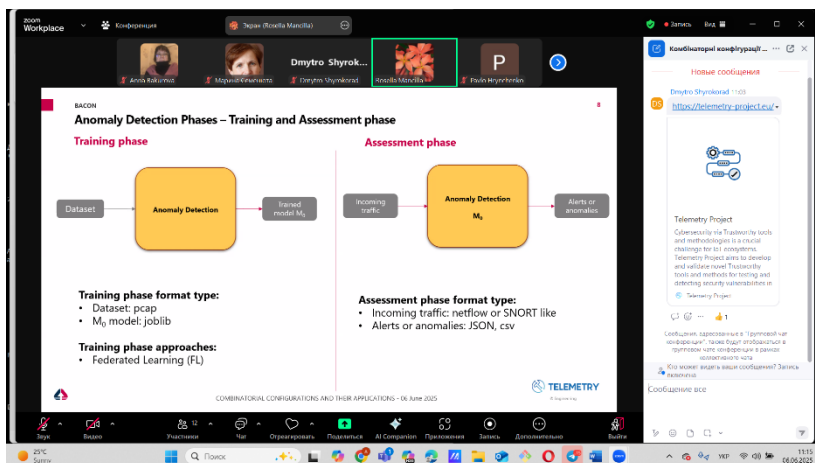
Засідання семінару 05.06.2025



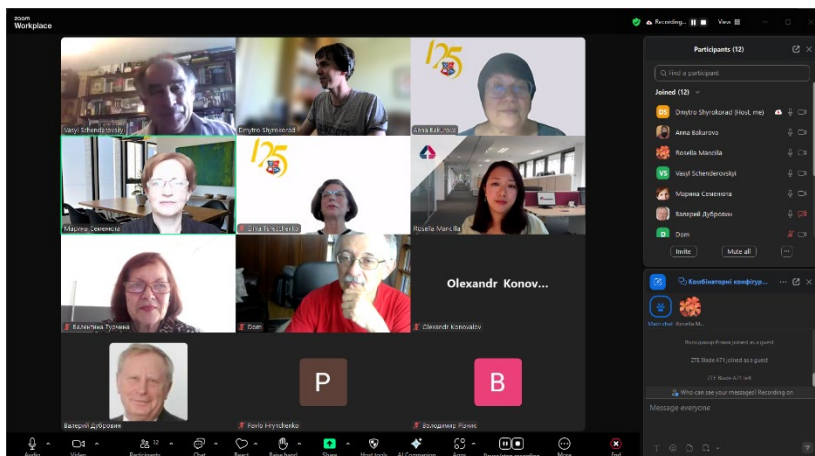
Фрагмент доповіді: Задача комівояжера з багатьма розв'язками,
СТЕЦЮК Петро Іванович, Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова
 НАНУ, м. Київ



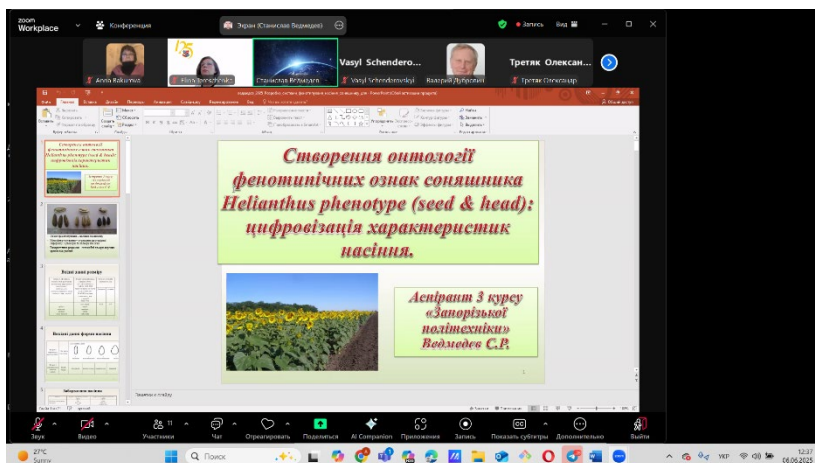
Фрагмент доповіді: Constraint programming with Conjure inside
 Jupyter Notebooks, **Özgür AKGÜN**, School of Computer Science,
 University of St Andrews, UK



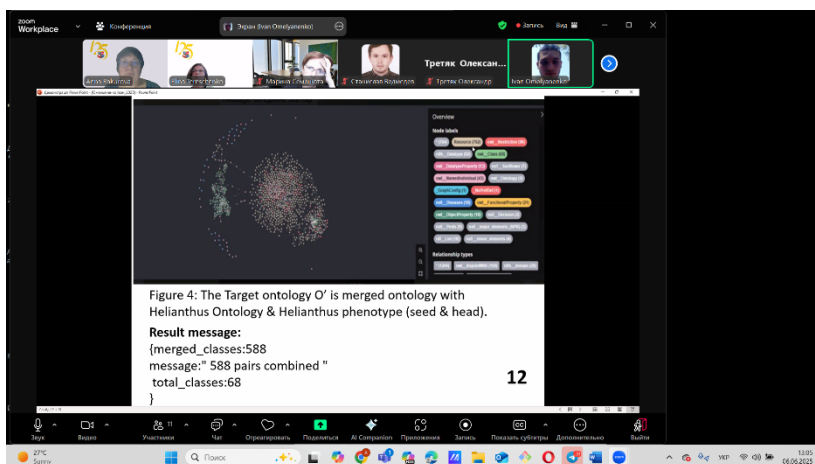
Фрагмент доповіді: A Federated Learning base Anomaly detection solution, **Rosella Omana MANCILLA**, ENGINEERING Ingegneria Informatica S.p.A., Software Development Specialist, Roma, Italia



Засідання семінару 06.06.2025



Фрагмент доповіді: **ВЕДМЕДЄВ Станіслав** ,
аспірант НУ «Запорізька політехніка»



Фрагмент доповіді: Graph-based ontology control system for the
agricultural domain: integration, **Ivan OMELIANENKO**
PhD-student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному
та мережному режимах

МАТЕРІАЛИ
*XXVII Міжнародного
науково-практичного семінару*
"КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ ТА ЇХНІ ЗАСТОСУВАННЯ",
присвяченого 125-річчю
Національного університету «Запорізька політехніка»
4-6 червня 2025 року

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна
документація.

Тираж 100 прим. Зам. № 543

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019