

DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.1.335709

УДК 004.942:621.311

А. І. Кузьмичов

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. Шпака, 2, Київ, 03113, Україна

e-mail: akuzmychov@gmail.com

Мережеве моделювання розкладу проектної програми за підходом Systems Engineering

Практика модельних досліджень знає багато прикладів, коли у системі логічно зв'язаних, але різних за постановкою, даними та призначенням задач, за певних причин ці задачі розв'язують окремо, а бажано би, спільно та доступними засобами, де автоматично, за загальним алгоритмом і узгоджено здійснюються перетворення «входи-виходи». Зроблено спробу побудувати комплексний обчислювач, елементарними обчислювачами якого є оптимізаційні моделі складових задач, на прикладі проектної програми. Відповідно, розроблено оптимізаційну мережеву модель проектної програми, «вузлами» якої є мережеві оптимізаційні моделі функціонально різних проектів, кожна з уніфікованою, але власною конфігурацією та даними, керована єдиним алгоритмом. Побудовано на доступній платформі електронних таблиць у вигляді інформаційно зв'язної дворівневої структури, функціонально — це інтегрований табличний обчислювач, який автоматично відтворює усі оновлені значення показників проектних мереж при змінах відповідних даних. Практична мета — на етапах розробки та планування унікальної проектної програми її менеджмент має вміти якнайшвидше і продуктивно реагувати на вимушені зміни конфігурації проектних мереж і даних автоматичним виконанням оптимізаційних обчислень.

Ключові слова: планування і управління проектами, оптимізаційне моделювання в Excel, Management Science, Project Management, Spreadsheet Modeling and Business Analytics.

1. Вступ

Systems Engineering (SE)

Початок 1900-х рр. у США характеризується сплеском інтенсивного розвитку масового виробництва, — в Європі йшла Перша світова війна, звідки йшли масштабні замовлення на різноманітну техніку військового призначення. Поки що слабка механізація разом з вимогами вчасного виконання багатьох і різних досить склад-

них проєктів висувають кричущу потребу розробки нових підходів щодо організації, планування, виконання і керування операціями, зокрема, гостру проблему кращого використання обмежених і дефіцитних наявних ресурсів, яка має різні масштаби: від світового (Європа – США) до групи компаній, підприємства і окремого цеху з різними формами реалізації. Саме ця проблема з роками залишається ключовою та рушійною силою щодо появи, вдосконалення і прогресивного розвитку промислових та аналітичних технологій і їхньої взаємодії, а це — виклик до розробки нових засобів реалізації: теорій, моделей, методів та інструментарію. Тоді конкретними і уособленими відгуками на ці виклики стали: прогресивна, зручна та наочна методика Генрі Гантта щодо щоденного відстеження ходу виконання системи робіт, дотепер відома і активно використовується (зокрема в MS Project) під назвою «діаграми Гантта»¹ в роботі з проєктами; формування Фредериком Тейлором² принципів наукового менеджменту (діаграми Гантта — складова), їхню суть: вводиться специфічна спеціальність «менеджер», його функція: формувати ефективне управлінське рішення та керувати його здійсненням, що потребує непростих і повторюваних математичних розрахунків з урахуванням наявних аналітичних та інструментальних ресурсів і їхніх властивостей, як от (у Тейлора): кількості працівників різних спеціальностей, досвіду, зацікавленості, розвитку умінь і особистих фізичних можливостей кожного, а також: норми, стандарти, документування, контроль якості, оргтехніка.

Суттєвого оновлення SE набуває із 1950-х рр. на тлі розвитку новітніх технологічних процесів та засобів, що супроводжувати напружений період «холодної війни» світової історії, базуючись на: винаході та використанні комп'ютерної техніки, прикладної і обчислювальної математики та мережеских комунікаційних технологій, що дозволило перейти до оперативного проєктування і виробництва надскладних організаційних та інженерно-технічних систем та комплексів.

Наступні глобальні виклики до технологічного реагування на різкий попит й обґрунтоване використання обмежених ресурсів виникали в світових/локальних збройних/економічних конфліктах. Відповідно, SE-підхід дозволяє концентрувати зусилля та засоби для задоволення попиту за сучасними напрямками Project Management та Management Science, узагальнені в SE у вигляді теорій, аналітичних моделей, методів і обчислюваних алгоритмів, програмних засобів та інструментів. Вони застосовуються в системних дослідженнях на будь-якому рівні для вироблення оптимальних рішень щодо проєктів і планів, у їхньому наступному аналізі, корегуванні, прийнятті, підтримці та супроводженні протягом реалізації [1–3].

Виконана робота є реальним втіленням SE-підходу, який з позицій системного підходу дозволив об'єднати різні задачі та їхні моделі в єдину обчислювальну структуру, не зважаючи на розмаїття вмісту задач: їхнього розміру, обсягів даних, структури мереж.

¹ G. Gantt (1903). A Graphical Daily Balance in Manufacturing

² F. Taylor (1911). The Principles of Scientific Management. Революційна на той час теорія та практика організації праці, «тейлоризм». Наприклад, за цією теорією «головна задача управління підприємством — забезпечувати максимальний прибуток для підприємця в з'єднанні з максимальним благополуччям для кожного зайнятого на підприємстві працівника».

Analytics (OR/MS)

Інтенсивна та продуктивна обчислювальна робота, визначена в науковому та проектному менеджменті, весь час супроводжує системні дослідження на відповідному рівні можливостей. На досвіді Другої світової війни сформувався напрям Operations Research (OR), після війни цей досвід набув розповсюдження в економіці та бізнесі як Management Science (MS), з часом утворивши комплексний напрям OR/MS. Масштабні успіхи у використанні інформаційно-комп'ютерних технологій і, зокрема, розвиток Data Science за останні пару десятирічь привели до формування сучасного аналітичного комплексу під загальною назвою Analytics [4], у практичних застосуваннях і освіті — Business Analytics (BA), розуміючи «Business» як будь-яку аналітичну ділову діяльність будь-де [5–18].

Analytics:

— міждисциплінарний науковий процес трансформації даних у знання для вироблення найкращих рішень:

— синтетична, різноманітна та складна дисципліна/сукупність дисциплін, яка іще утворюється і тому визначена по-різному різними практиками і організаціями, зберігаючи базову структуру та вміст;

— цінний ресурс для дослідників і управлінців у бізнесі/промисловості/освіті, які відшуковують способи повної та ефективної інтеграції аналітики у розв'язання організаційних проблем, вироблення для прийняття рішень та стратегічного планування.

Цей лаконічний термін узагальнює аналітичну діяльність і дослідницьку практику вмістом ряду загальноприйнятих дисциплін: статистики, дослідження операцій, економіки, інформатики, системного та промислового інжинірингу, математики, науки про дані тощо, хоча й сприймається фахівцями по-різному.

Узагальнено це: кількісний, тобто, побудований на даних і досконалих обчисленнях, підхід до вироблення організаційних рішень, його концептуальна структура умовно складається із трьох специфічних аналітик: Descriptive (Описова), Predictive (Прогнозна) та Prescriptive (Оптимізація, Симуляція, Рішення). Відповідно, аналітичний процес можна розглядати як безперервний цикл, у якому: наявні дані (Data) аналізуються (Analysis), продукуючи інформацію (Insight, знання) для вироблення шуканого рішення (Decision).

Виконана робота базується на активному застосуванні доступних аналітичних інструментів, вільних від потреби програмувати, що відкриває шлях до користувачів різних спеціальностей, зокрема, менеджерів, фінансистів та економістів, для яких Excel не лише засіб моделювання, а основний робочий інструмент.

Project Management (PM)

Поштовхом до появи цього напрямку став успішний «продукт» оптимізаційного моделювання на ЕОМ, — винахід унікального та математично обґрунтованого методу критичного шляху (CPM) як саме мережевої моделі проекту (1959 р., [19]), на запити проектної практики миттєво виникають і продуктивно застосовуються інші версії методу та потужні спеціалізовані програмні системи.

Мета PM: планування та координація виконавчих дій для вироблення якісного продукту чи послуги в рамках обмежень розкладу, бюджету, ресурсів, інфраструктури, наявного персоналу та технологій, узгоджене із системними інженерами. Визначилася усталена світова практика системної організації виробничих

процесів, стало нормою розпочинати будь-який унікальний проєкт за міжнародними стандартами та методологією.

Щодо аналітики, мережева орієнтація складних проєктів за SE-підходом базується на аналітичній платформі з використанням апарату теорії графів і мереж, інструментальних засобів оптимізаційного моделювання та засобів візуалізації мережевих структур [20–31].

Предмет виконаної роботи — діяльність із планування та розробки розкладу реальних проєктів і їхніх об'єднань у рамках проектної програми. Фактично, отриманий результат найпростіше можна впровадити шляхом участі в розробці реального проєкту чи проектної програми у складі персоналу відповідного проектного офісу організації.

2. Мережеве моделювання проєкту

2.1. Зображення моделі: направлена та зважена вузлова мережева діаграма проєкту складається із m вузлів-операцій (значення m фактично визначає розмір задачі), кожен у вигляді прямокутника/овалу, має вхід/входи і вихід/виходи, та дуг, що з'єднують вузли згідно визначеного відношення передування (за стандартним відношенням Finish-Start стрілка дуги з'єднує вихід попереднього вузла з входом наступного) за діючої технологічної послідовності.

Проектна мережа може мати декілька початкових (які одночасно розпочинаються) та завершальних вузлів, але за стандартом і зручністю (особливо для мережі мереж проєктів) призначають два загальних (штучних) вузли, на рис. це Старт (H) та Фініш (Z), з'єднані з початковими (I, J) і завершальними (T, Y) вузлами штучними дугами, відповідно. Кожен вузол має ідентифікатор та основний ваговий коефіцієнт — тривалість операції, інші — це питомі витрати ресурсів/вартість, типова конфігурація (рис. 1).

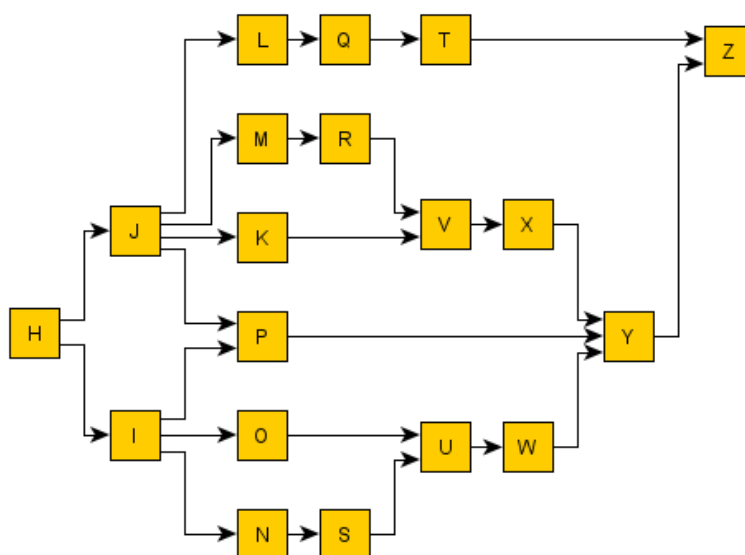


Рис. 1. Мережева діаграма проєкту

2.2. Мережева модель проекту — комплект із двох задач оптимізації, які розв'язуються послідовно.

Тут: РС, ПС (ранні та пізні старті i -ї операції, r_i, p_i), $i = 1 \dots, m$. За знайденими значеннями r_i, p_i обчислюють аналогічні оцінки для фінішів (РФ, ПФ) і, важливо, значень резервів часу, чим визначається критичність кожної операції і, на завершення, шукана мінімальна тривалість проекту (дорівнює довжині максимального шляху від старту до фінішу).

Математична модель

Задача оптимізації (РС)

I. Знайти вектор $R = (r_1, \dots, r_m)$, r_i — шуканий РС i -ї операції, щоб

II. ЦФ $r_1 + \dots + r_m \rightarrow \min$

III. за обмежень: $r_j - r_i \geq d(i)$, $d(i)$ — тривалість i -ї операції зі зв'язком $i \rightarrow j$ і граничних умов: усі $r_i \geq 0$.

Задача оптимізації (ПС)

I. Знайти вектор $P = (p_1, \dots, p_m)$, p_i — шуканий ПС i -ї операції, щоб

II. ЦФ $p_1 + \dots + p_m \rightarrow \max$

III. за обмежень: $p_j - p_i \geq d(i)$, $p_i = r_i$ і граничних умов — усі $p_i \geq 0$.

2.3. Формульна модель

Ідея формульної реалізації мережевої моделі – використання вбудованих функцій MAX (для прямого проходу) та MIN (для зворотного проходу), їхніми аргументами будуть відповідні значення операцій-попередників (для прямого проходу) чи операцій-наступників (для зворотного проходу). Перевага: виключається необхідність звертатися до програми-оптимізатора, відповідно та суттєво: без обмеження на розмір задачі.

Процес зводиться до подвійного (РС, ПФ) циклічного (за числом операцій та операцій-попередників) алгоритму, де на кожному кроці здійснюються: зовнішній цикл за заданим поточним індексом операції; внутрішній цикл: перегляд операцій-попередників, якщо вони є, включити їхні значення РФ до аргументів функцій MAX/MIN. У результаті формується універсальна автоматна модель, де оптимізаційні обчислення здійснюються без виклику програми-оптимізатора, значить, без обмежень на розмір задачі [32].

3. Мережа мереж (мережа мережевих моделей проектів)

З теорії і практики мережевого планування та управління проектами відомо, що для складного реального проекту проектна мережа характеризується сотнями вузлів і дуг, різноманітними ресурсами, що використовуються для здійснення відповідних операцій. Таку неосяжну для свідомого аналізу мережу модифікують укрупненням (декомпозицією «знизу уверх»), зводячи її до ієрархічної багаторівневої структури, де мережа нижнього рівня є деталізацією окремої операції мережі вищого рівня (рис. 2).

Після фрагментації заданої мережі на систему узгоджених і, важливо, інформаційно зв'язаних мереж меншого розміру в межах відповідальності відповідних

° обмеження $r_j - r_i \geq d(i)$ гарантує, що j -та операція дійсно слідує за i -ю, як і має бути, якщо ж $r_j - r_i < d(i)$, значить, вони перекриваються, що неприпустимо

проект-менеджерів, постає завдання організації прямого інформаційного обміну між рівнями мережевої моделі.

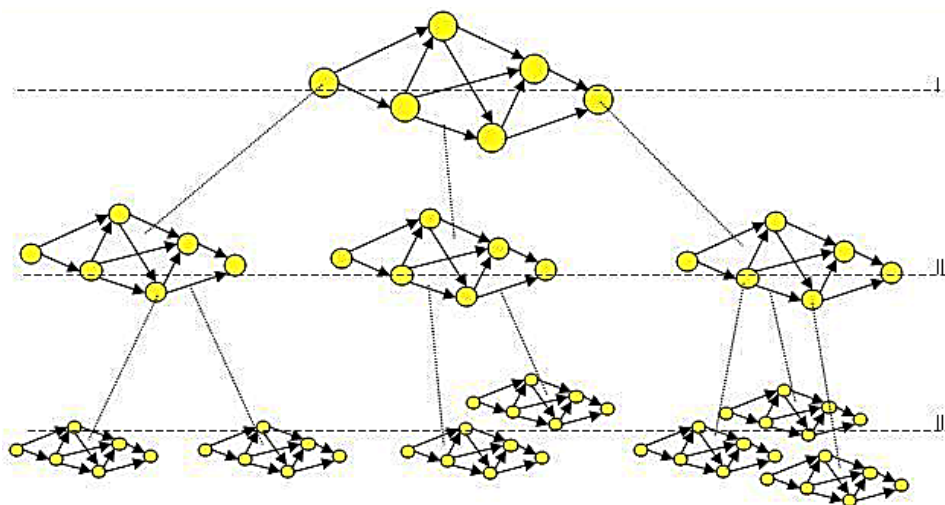


Рис. 2. Мережа мережевих моделей проектів

Приклад 1

Постановка задачі: скласти розклад виконання 19 операцій ($m = 19$) згідно проектної мережевої діаграми, з визначення оцінок величин: РС, РФ, ПС, ПФ, Рез(ерв) формульною моделлю. Додатково: якщо задано питомі витрати ресурсу для кожної операції, побудувати ресурсну діаграму Гантта та стовпчасту діаграму. Табличну модель задачі про оптимальний розклад показано на рис. 3.

Якщо користуватися стандартними оптимізаційними програмами проектного менеджменту, треба організувати колективну роботу кількох модулів проектної програми, що для багаторівневої структури великого розміру зробити неможливо: із-за витрат часу на пошук оптимуму, потрібна автоматна та миттєва реалізація процесу оптимізації, де пошук оптимуму — складна, але одна формула (з посиланнями).

За SE-підходом побудована динамічна таблична модель синхронізує роботу проектних мереж усіх рівнів: мережі нижніх рівнів поставляють на верхні рівні свої кінцеві результати (як от мінімальну тривалість власних проектів), що слугують даними для моделі верхнього рівня, усі табличні моделі мають уніфіковану конструкцію та зберігаються на: аркушах робочої чи віддалених електронних книг, між ними посилання між відповідними клітинками.

За сформованою композицією активних електронних таблиць генерується узагальнений табличний документ для вузлів і дуг, для візуалізації — відповідна проектна мережева діаграма [33].

Завдяки прямим інформаційним зв'язкам, які утворені зв'язуванням клітинок табличної моделі, будь-які зміни даних будь-де автоматично приводять до нових результатів. Автоматна модель такого типу надзвичайно ефективна саме на початковому етапі розробки структури, планування і аналізу функціонування унікальної системи для прийняття рішень в умовах визначеності/невизначеності.

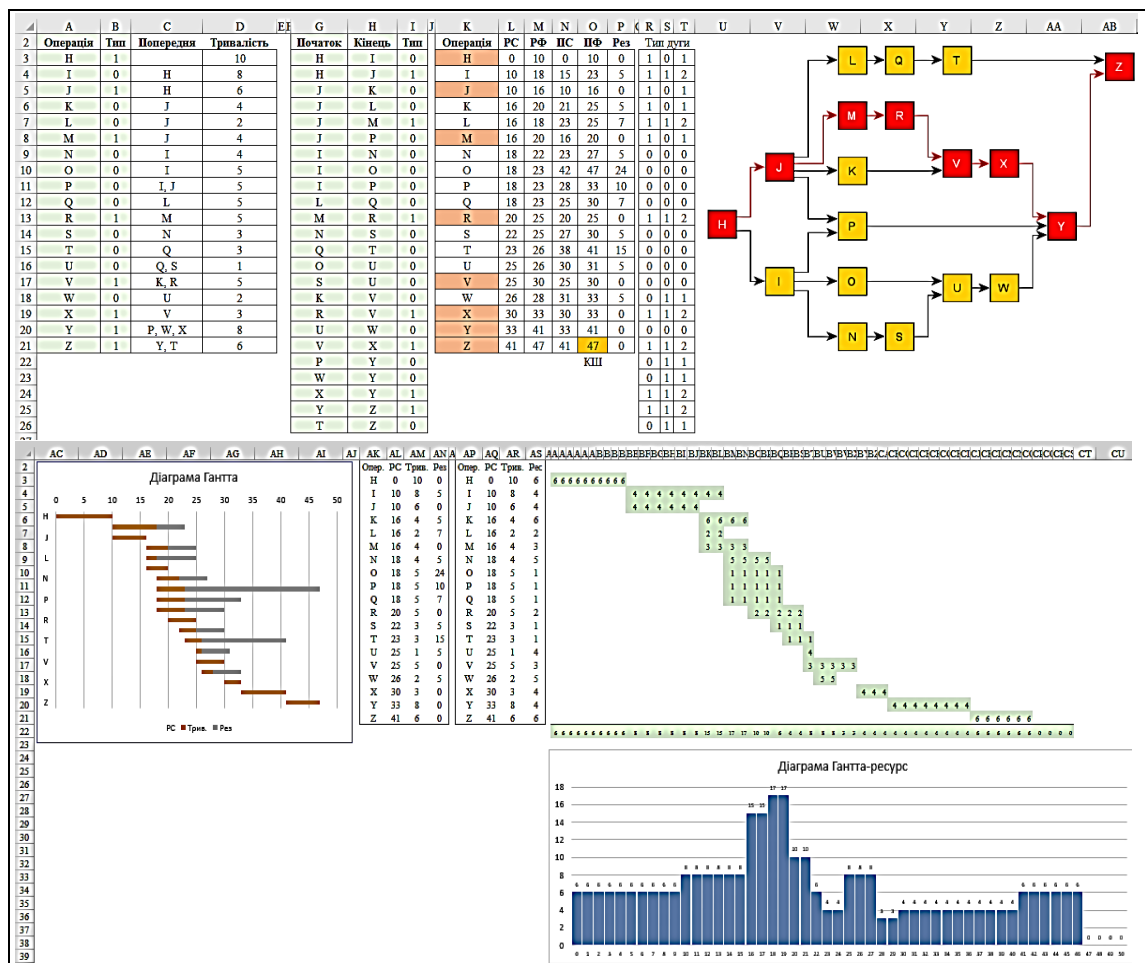


Рис. 3. Часові характеристики, проектна мережа, діаграми Гантта (час, ресурс)

Приклад 2

Будова уніфікованої дворівневої проектної мережі (проект і субпроекти): нижній рівень утворюють мережеві моделі субпроектів (приблизно одного розміру, але різної конфігурації і даних) стандартного формату і змісту, які представляють укрупнені операції мережі проекту верхнього рівня, із відповідними зв'язками. Використовується формульна математична модель, завдяки чому зміна хоч одного значення входу будь-якого проекту, структури чи конфігурації мережі може змінити увесь результат, який візуалізується.

Постановка задачі: скласти розклад 2-рівневої мережевої моделі, де нижній рівень утворюють 5 проектів, у кожному виконується 20 операцій ($m = 100$) згідно відповідної проектної мережевої діаграми, відповідно, мережа верхнього рівня має 5 операцій-проектів, з визначення оцінок величин: РС, РФ, ПС, ПФ, Рез(ерв).

Табличну модель верхнього рівня 2-рівневої мережевої моделі наведено на рис. 4.

D3		▼	:	✕	✓	f_x	=ПР1!О11									
▲	A	B	C	D	EI	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	Операція	Тип	Попередня	Тривалість		Початок	Кінець	Тип		Операція	РС	РФ	ПС	ПФ	Рез	
2	Start	1		0		Start	ПР1	0		Start	0	0	0	0	0	
3	ПР1	0	Start	39		Start	ПР2	1		ПР1	0	39	1	40	1	
4	ПР2	1	Start	40		ПР1	ПР4	0		ПР2	0	40	0	40	0	
5	ПР3	0	ПР1 ПР2	36		ПР1	ПР3	0		ПР3	40	76	50	86	10	
6	ПР4	1	ПР1 ПР2	46		ПР2	ПР5	1		ПР4	40	86	40	86	0	
7	ПР5	1	ПР2 ПР3 ПР4	59		ПР2	ПР4	1		ПР5	86	145	86	145	0	
8	Fin	1	ПР5	0		ПР3	ПР5	0		Fin	145	145	145	145	0	
9						ПР3	ПР4	0							КШ	
10						ПР4	ПР5	1								
11						ПР5	Fin	1								
12																

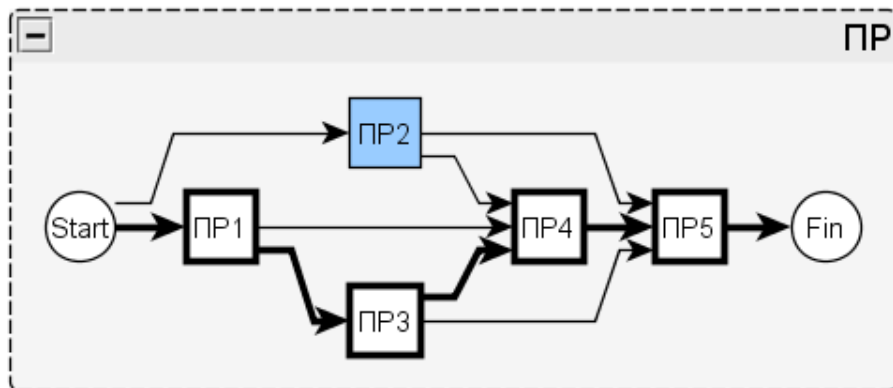
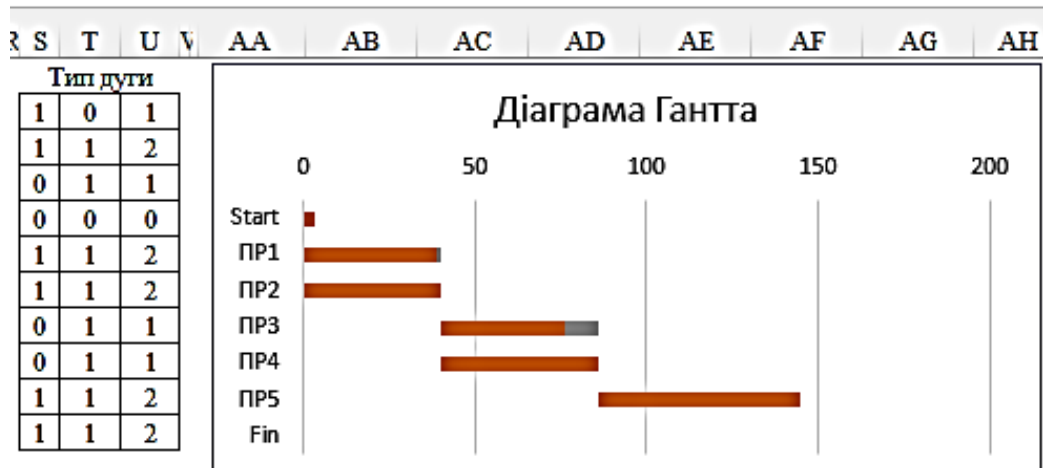


Рис. 4. Головний модуль (5 операцій — 5 проектів)

Таблична модель проекту нижнього рівня 2-рівневої мережевої моделі (рис. 5).

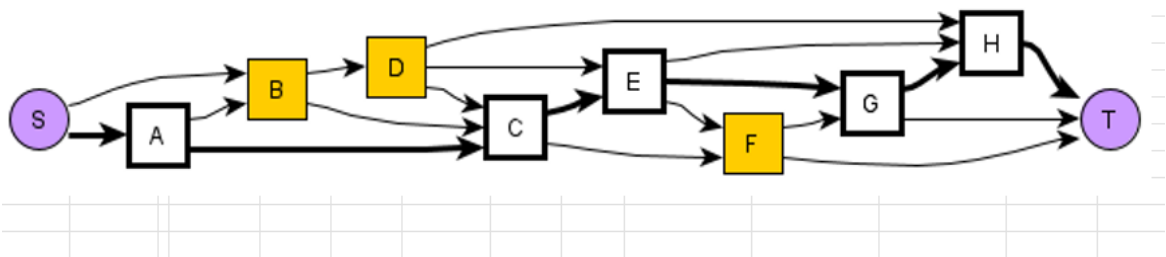
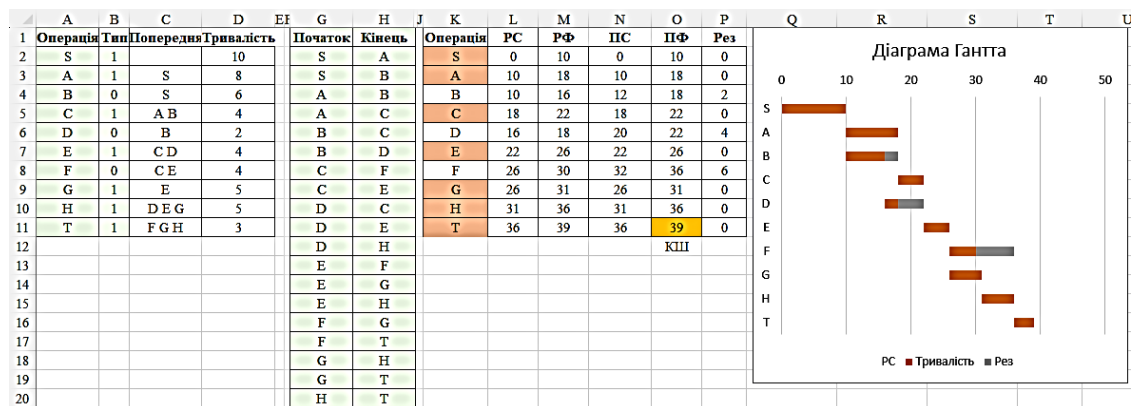


Рис. 5. Робочий модуль (проект)

На рис. 6 показано критичний шлях у компактній, а на рис. 7 у розгорнутій проектній мережевій діаграмі.

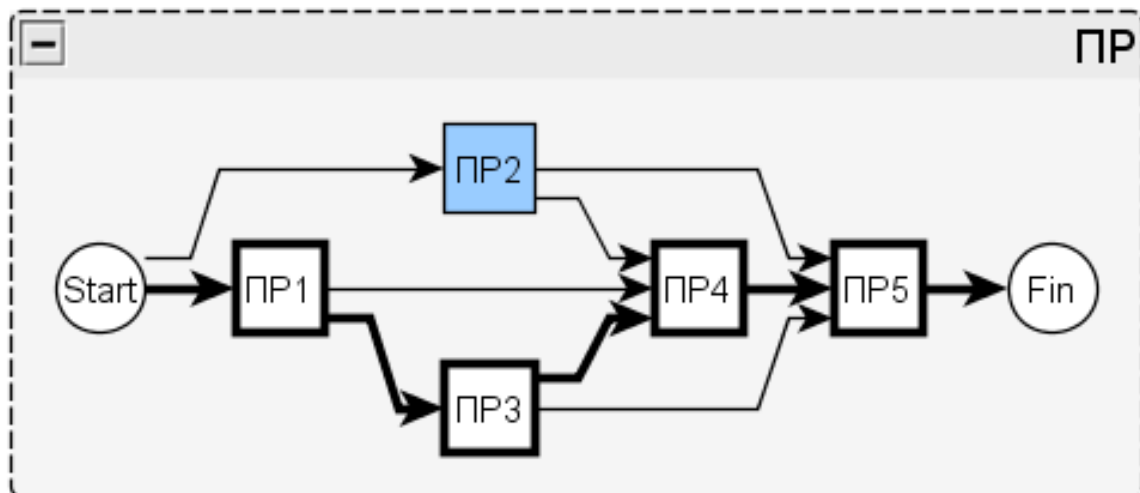


Рис. 6. Критичний шлях у мережі мережевих моделей 5 проектів: компактна модель

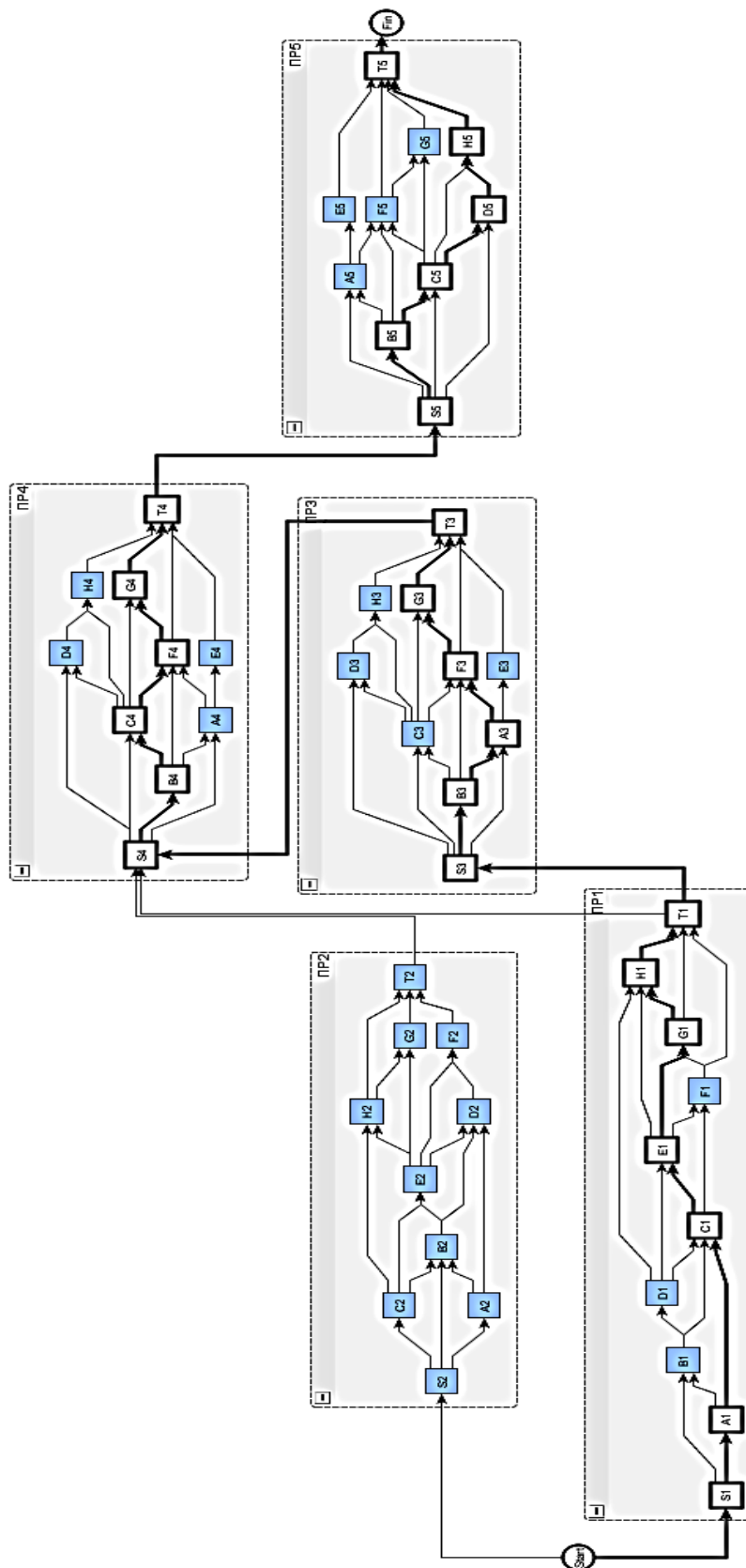


Рис. 7. Критичний шлях у мережі мережевих моделей 5 проєктів: розгорнута модель

4. Обговорення та висновки

Роботу виконано за аналізом доступних публікацій у будь-якій області досліджень із використанням доступного аналітичного інструментарію.

За відкритими публікаціями із вкрай обмеженими даними, в крупних закритих проєктах (космос, безпека, критичні ресурси, державне управління) інтеграція системних SE-моделей здійснюється на багатомашинних комплексах із застосуванням спеціального софтверу та персоналу, деталі не розголошуються.

Розроблена за системним підходом аналітична модель класу «мережа мереж» дозволяє краще зрозуміти «командну гру» зв'язаних певною груповою дисципліною «віртуальних» учасників (мережових моделей проєктів), кожен з яких є не простою конструкцією із власною конфігурацією проєктної мережі, даними і алгоритмом поведінки, маючи однакове призначення та спільні властивості. При колективному обговоренні менеджерами проєктів поточних результатів, отриманих у числовій і наочній формах моделюванням на доступній платформі Excel, їхнє швидке оновлення має спростити пошук кращого серед альтернативних рішення.

Сфера критичних організаційних структур світового рівня і швидких і зважених управлінських рішень, підтримувані підходом Systems Engineering, це природний і необмежений за постановками системних задач простір. Набутий досвід при виконанні цієї, можливо, першої, за використаними доступними кожному інструментальними засобами, роботи має бути в нагоді при організації аналогічних за організацією системних досліджень, зокрема, в рамках проєктного менеджменту.

1. Goode H., Machol R. Systems Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems. McGraw-Hill, 1957. 348 с.
2. Hall A. A Methodology for Systems Engineering, Princeton, 1965. 448 с.
3. SEBoK: Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge. BKCASE, 2017. 1183 p.
4. ABoK: Analytics Body of Knowledge. INFORMS. Wiley, 2019. 386 p.
5. Hillier F., Lieberman G. Introduction to Operations Research, 11-ed. Wiley, 2021. 978 p.
6. Rardin R. Optimization in Operations Research: 2-ed. Wiley, 2017. 1187 p.
7. Anderson D. et al. An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making. 13-ed. S-W Cengage Learning, 2012. 1045 p.
8. Taylor B. Introduction to Management Science. 11-ed. Pearson, 2013. 841 p.
9. Baker K. Optimization Modeling with Spreadsheets. 3-ed. Wiley, 2016. 356 p.
10. Кузьмичов А.І. Оптимізаційне моделювання в MS Excel. Практикум. Київ.: ПІПІ НАНУ, 2017. 438 с.
11. Evans J. Business Analytics. Methods, Models, and Decisions: 3-ed. Pearson, 2019. 653 p.
12. Powell S., Baker K. Business Analytics. The Art of Modeling with Spreadsheets. Wiley, 2017. 555 p.
13. Camm J. et al. Business Analytics: Descriptive. Predictive. Prescriptive, 3-ed. Cengage Learn., 2019. 818 p.
14. Panik M. Linear Programming and Resource Allocation Modeling. Wiley, 2019. 449 p.
15. Albright C., Winston W. Business Analytics: Data Analysis and Decision Making, 7-ed. Cengage Learn., 2020. 914 p.
16. Analytic Solver Optimization. Analytic Solver Simulation: User Guide. Frontline Solvers, 2020. 567 p.
17. Ragsdale C. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. A Practical Introduction to Business Analytics, 9-ed. Cengage, 2022. – 908 p.
18. Кузьмичов А.І. Аналітика мережових структур. Моделювання засобами WinQSB та MS Excel: Практикум. Київ: Вид-во Ліра-К, 2018. 208 с.
19. Kelley J., Walker M. Critical-Path Planning and Scheduling. Proc. E-J. Com. Conf., 1959. 13 p.

20. Moder J., Phillips C. Project Management with CPM and PERT, NY, 1964. 304 с.
21. Moder J., Phillips C., Davis E. Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming, 3-ed. Van Nostrand Comp. 1983. 408 p.
22. Turner R. The Handbook of Project-Based Management. Leading Strategic Change in Organization, 3-ed. 2009. 473 с.
23. Heldman K., Heldman W. Microsoft Office Excel 2007 for Project Managers. Wiley, 2007. 364 с.
24. Kerzner H., Belack C. Managing Complex Projects. Wiley, 2010. 419 p.
25. Kerzner H. Project Management. A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling, 11-ed. Wiley, 2013. 1296 p.
26. Badiru A., Osicanya S. Project Management for Oil and Gas Industry. A World System Approach. CRC Press, 2013. – 759 p.
27. PMBoK: Guide to Project Management Body of Knowledge, 5-ed. PMI, 2013. 616 p.
28. Кузьмичов А. І. Планування та управління проєктами. Моделювання засобами MS Excel: Практикум. Київ: Вид-во Ліра-К, 2016. 181 с.
29. Golpira H. (Ed.) Application of Mathematics and Optimization in Construction Project Management. Springer, 2021. 261 p.
30. Nicolas J., Steyn H. Project Management for Engineering, Business and Technology, 6-ed. Routledge, 2021. 755 p.
31. Додонов О.Г., Кузьмичов А.І. Мережеві організаційні структури управління. Моделювання та візуалізація засобами Excel. Київ: Вид-во Ліра-К, 2021. 264 с.
32. Ragsdale C. A New Approach to Implement Project Networks in Spreadsheets. INFORMS Trans. On Education 3:3.
33. Кузьмичов А.І. Візуальна аналітика мережевої оптимізації. Моделювання засобами MS Excel та yEd Graph Editor. Практикум. Київ: Вид-во Ліра-К, 2022. 190 с.

Надійшла до редакції 25.03.2025