

УДК 004.942.519.87(045)

А. І. Кузьмичов

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна
e-mail: akuzmychov@gmail.com

Аналіз ризиків у мережевих моделях проектів засобами імітаційної оптимізації

Об'єкт ризик-аналізу — мережева модель унікального проекту, де тривалості робіт мають імовірнісну природу, кінцеві параметри моделі — оцінки ризиків щодо порушення запланованих параметрів при здійсненні проекту: тривалості чи загальних витрат, розраховуються за інтегрованою технологією імітаційної оптимізації. Новітня аналітична технологія імітаційної оптимізації для формування рішень поєднує можливість врахувати невизначений характер вхідних параметрів досліджуваного процесу, отримати аналітичну форму цільової функції з керованою процедурою вибору оптимального варіанта.

Ключові слова: імітаційне та оптимізаційне моделювання, ризик-аналіз, управління проектом, мережева модель проекту, інструментальне середовище ASP Excel, simulation optimization.

Вступ

Проектно-орієнтовані організації будь-якого рівня відповідальності ризикують завжди, тож аналіз та управління ризиками для них мають фундаментальне й вирішальне значення. Саме кількісна модель об'єкта досліджень оцінює вплив невизначених параметрів на кінцеві результати, зокрема, на очікувані прибутки, витрати чи втрати, доходи від інвестицій, екологічні наслідки, тривалість технологічного процесу тощо.

Тож фундаментальний шлях, щоб дізнатись, як врахувати невизначеність — це проведення експерименту, конкретно на діючому об'єкті чи в процесі, якщо це можливо та небезпечно, чи, частіше та зручніше, на моделі певного типу. Адже саме на моделі можна дізнатися, що станеться в реальності, виконавши серію експериментів, навіть неприпустимих у штатних ситуаціях. Типова та традиційна організація експериментів в умовах невизначеності і ризику — імітаційне моделювання (ІМ, simulation), де засобами комп'ютерного моделювання реалізуються багатокрокові серії експериментів методами Монте-Карло, для кожної накопичується статистика; кінцевий результат — отримання колекції узагальнених звітів. Однак

остаточне рішення формує дослідник вибором варіанта на свій розсуд без будь-якого порівняння звітів й обґрунтування вибору.

Тепер методика ІМ, доповнена модулем оптимізації, є сучасною і особливо корисною аналітичною технологією імітаційної оптимізації (ІО, *simulation optimization*), де за наявності різних і взаємопов'язаних джерел невизначеності, які взаємодіють у певному організаційному процесі, за відповідним пошуковим алгоритмом визначається обґрунтоване та зважене рішення. В роботі ця новітня технологія досліджується шляхом розв'язання задач планування і управління проектами великого розміру, яка здійснюється в умовах ризику [1].

Імітаційна оптимізація: метод, аналітична технологія та реалізація

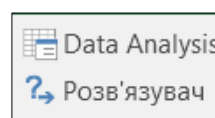
Засоби ІО призначені для реалізації комбінованої аналітичної технології у межах математичного та комп'ютерного моделювання, де апарат оптимізаційного моделювання (*optimization*), що діє в умовах визначеності значень коефіцієнтів шуканих невідомих, застосовується для обробки поточних наборів даних, які попередньо формуються в процесі імітації (*simulation*) для врахування умов невизначеності та ризику. Продуктивна комбінація імітації та оптимізації очікувалася давно, але стала реальністю як результат поступового розвитку стохастичного програмування та відповідного інструментарію. ІО, завдяки наявності потужних обчислювальних засобів і розробці оригінальних пошукових алгоритмів, відкриває шляхи до наближеного розв'язання ускладнених оптимізаційних задач у визначених/невизначених умовах прийняття рішень, зокрема, задач з кількома й, можливо, складними та навіть конфліктуючими цільовими функціями, лінійними та нелінійними обмеженнями на значення шуканих невідомих тощо.

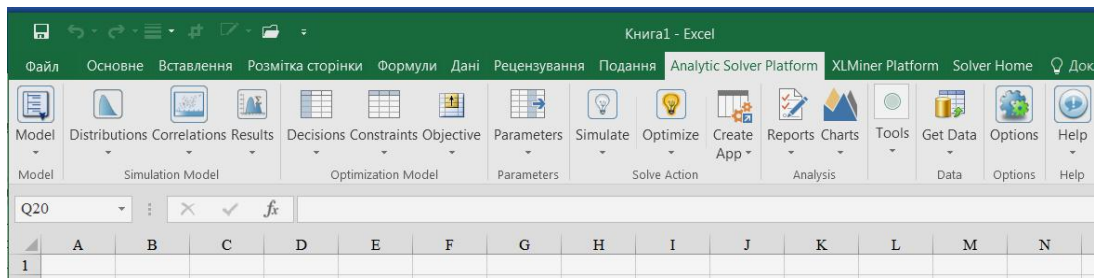
На спрощеному та доступному рівні методику ІО можна реалізувати стандартними засобами Excel за допомогою надбудов *Розв'язувач (Поиск решения)* та *Data Analysis (Анализ данных)*, де певним чином формується остаточна таблиця даних за результатами імітації; її розміри: кількість стовпців дорівнює кількості невизначених змінних, кількість рядків — це кількість спроб генерування випадкових чисел, далі — отримання інформації обчисленням узагальнених статистичних характеристик за цими даними. Суттєвий недолік цього підходу — вкрай обмежений набір функцій розподілу ймовірностей і дещо громіздка робота з отримання даних.

Найкраще технологія ІО реалізована у середовищі Excel з використанням одного з трьох (реально їх кілька десятків) популярних програмних продуктів, які є базовими засобами сучасної бізнес-аналітики [2–4]. Кожен з них є надбудовою Excel з узгодженою за інтерфейсом комбінацією двох, колись автономних, тепер «поріднених» інструментальних засобів — імітатора та оптимізатора [5, 6], це:

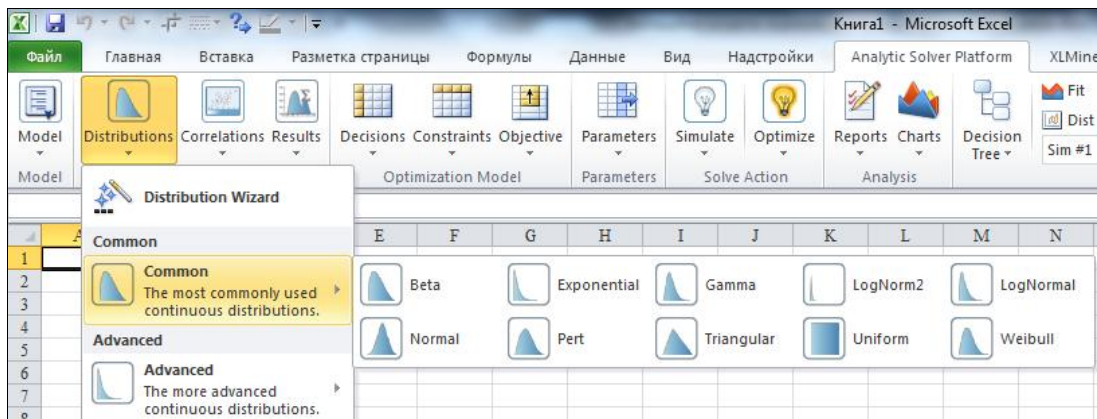
- *Cristal Ball Professional + OptQuest Optimizer (Oracle)*;
- *@RISK Industrial + Evolver/RiskOptimizer (Palisade)*;
- *ASP (Analytic Solver Platform = Risk Solver + Premium Solver), Frontline Systems*.

У прикладі застосовані інструментальні засоби ІО відкритої освітньої платформи *ASPE* [7] за їхній високий рейтинг, спадковість та інтерфейс стандартних надбудов Excel.





У цій платформі формуються дві моделі: імітаційна (*Simulation Model*) та оптимізаційна (*Optimization Model*). Імітаційна модель для кожної змінної невизначеного типу пропонує вибрати бажаний тип функції розподілу ймовірностей (їх біля 50-ти) з відповідними аргументами. Зокрема, для моделювання проектної мережі у наведеному нижче прикладі зазвичай застосовуються дві функції розподілу: *Triangular* чи *Pert* з групи *Common*, в електронній таблиці їх зручно задавати формулами з посиланням на аргументи у відповідних клітинках робочої таблиці: $PsiTriangular(a,m,b)$ або $PsiPert(a,m,b)$ ¹:



Оптимізаційна модель є розвинуеною модифікацією надбудови *Розв'язувач*, має стандартні складові: шукані невідомі, цільову функцію та обмеження на невідомі.

Важливо: обидві моделі діють спільно, імітаційна модель подає в оптимізаційну модель сформовані комп'ютерним експериментом дані, у свою чергу оптимізаційна модель реалізує відповідний алгоритм вибору кращого варіанта, результат фіксується, аби після серії спроб сформувані кінцевий висновок щодо очікуваних ризиків, представлених, як звісно, у вигляді кінцевої функції розподілу ймовірностей і відповідних математико-статистичних показників. На відміну від тра-

¹ PSI (*Polymorphic Spreadsheet Interpreter*) — фірмова «родзинка» компанії Frontline; PSI-технологія суттєво відрізняється від вбудованих функцій Excel з опрацювання (інтерпретації, перетворення, кодування і арифметичної обробки) табличних даних: там, де Excel покроково опрацьовує кожне число, ця технологія робить це одразу для масиву даних і тому найкраще застосовується саме для методу Монте-Карло, де генеруються і обробляються тисячі пробних значень елементів кожної із багатьох формул табличної моделі, що призводить до пришвидшення обчислювального процесу у 100 й більше разів. Тож, специфічне ім'я функції, наприклад, $PsiTriangular$, означає, що це пришвидшена версія аналогічної функції *Triangular* в інших програмних засобах.

диційного підходу (методу PERT²), ця процедура повністю автоматизована, що цінно для задач великого розміру.

Організація ризик-аналізу в ASP Excel. Приклад

Мережева вузлова модель проекту складається з 20-ти робіт (P-1÷P-20) із розширеним набором відношень передування: FS (Finish-Start), FF (Finish-Finish), SF (Start-Finish), SS (Start-Start) і часовим лагом (затримка/випередження, +/-), що дещо ускладнюючи розрахунки, дозволяє представити довільну специфіку проекту (рис. 1).

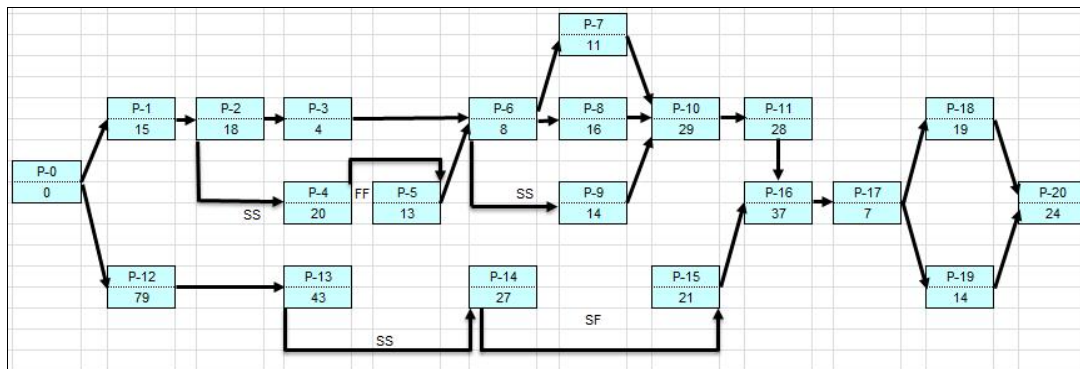


Рис. 1. Мережева модель проекту (стандартне відношення FS не показано)

Згідно класичної методології PERT, що застосовується для моделювання проектів в умовах невизначеності, тривалості робіт задані трійками (a_i, m_i, b_i) , де: a_i, m_i, b_i — оптимістична (min), «середня» (likely) та песимістична (max) тривалості, відповідно.

Для врахування витрат коштів задано квадратичну функцію $v_i(t_i) = a_i - b_i t_i - c_i t_i^2$ прямих витрат для кожної i -ї роботи, а також v_0 — організаційні та v_1 — поточні (щоденні) витрати, загальні витрати здійснення проекту: $V = v_0 + v_1 t_p + \sum_{i=1}^{20} v_i t_i$, де t_p — тривалість проекту (довжина критичного шляху).

Вимушено (з-за відсутності потрібних у 1960-х рр. необхідних машинних ресурсів) приведений до детермінованого варіанта метод PERT у часовій постановці визначає прийнятну для розрахунків тривалість i -ї роботи у часовому діапазоні $[a_i, b_i]$ за формулою: $t_i = \frac{a_i + 4m_i + b_i}{6}$; ці показники надалі розрахунками ви-

значають імовірність (а не найменшу тривалість за методом CPM) здійснення проекту у визначений термін. У наші часи метод PERT у тих же умовах невизначеності початкових даних і поточної ситуації у процесі реалізації проекту найкраще реалізується засобами імітаційного моделювання, де ризик відхилення терміну здійснення проекту від директивного терміну представляють не одним числом (значенням ймовірності, їх безліч і вони кожного разу різні), а щільністю роз-

² Модер Дж., Филлипс С. Метод сетевого планирования в организации работ (ПЕРТ). Москва: Энергия, 1966.

поділу ймовірності, що значно краще відображає ситуацію щодо часових і вартісних ризиків, які пов'язані з виконанням проекту у заплановані термін і бюджет, відповідно — це складова Ю. Розглядається ускладнена час-вартісна постановка задачі планування та управління проектом, витрати обмежені/необмежені, для тривалостей робіт вибрано цілочислове значення трикутної функції розподілу ймовірностей, наприклад, для роботи Р-1 це функція $=INT(PsiTriangular(12;15;23))$ — рис. 2.

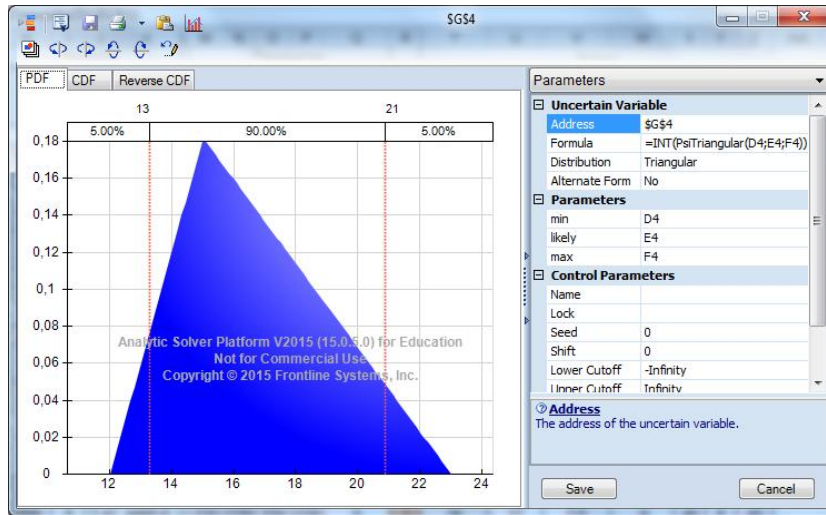


Рис. 2. Генератор функції $INT(PsiTriangular(a;m;b))$

Відшукуються:

- часові параметри робіт: РС (ранній старт), РФ (ранній фініш), ПС (пізній старт), ПФ (пізній фініш), ЗР (загальний резерв часу), КШ (приналежність критичному шляху);
- мінімальна тривалість проекту (довжина критичного шляху);
- вартісні характеристики, витрати: прямі, непрямі, загальні;
- оцінки ризиків: для робіт і всього проекту.

Таблична модель. Результати

На рис. 3–7 наведено кінцеві результати проведених розрахунків.

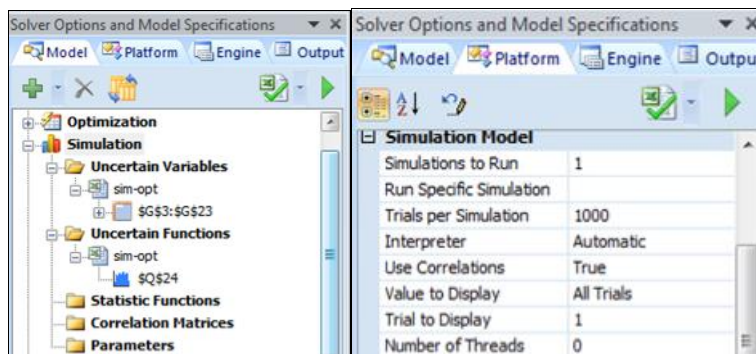


Рис. 3. Параметри табличної моделі

Робота	Поперед.	Наст.	Тривалість				Вартість				Прямі витрати	Параметри					Зв'язок							
			t _a	t _m	t _b	t	a	b	c	PC		PF	ПС	ПФ	Заг. резерв	КШ	Початок (i)	Кінець (j)	Віднош.	Ляг (L _{ij})	D(i)	D(j)	Старт	
0		1 12	0	0	0	0						0	0	0	0	0	1	0	1	FS	2	0	12	2
1	0	2	12	15	23	19	3493	6	3	2296,0	2	21	2	21	0	1	0	12	FS	0	0	81	0	
2	1	3	15	20	22	19	4506	8	5	2549,0	16	35	16	35	0	1	1	2	FS	-5	19	19	14	
3	2	6	2	6	10	3	7558	10	4	7492,0	38	41	42	45	4	0	2	3	FS	3	19	3	22	
4	2	5	15	18	23	17	5004	6	10	2012,0	26	43	26	43	0	1	2	4	SS	10	19	17	10	
5	4	6	13	15	17	16	6786	10	4	5602,0	31	47	31	47	0	1	3	6	FS	-3	3	5	0	
6	3,5	7 8 9	2	7	12	5	5375	9	7	5155,0	42	47	42	47	0	1	4	5	FF	4	17	16	5	
7	6	10	7	12	16	10	6712	7	4	6242,0	52	62	70	80	18	0	5	6	FS	-5	16	5	11	
8	6	10	10	15	20	14	6334	9	9	4444,0	59	73	59	73	0	1	6	7	FS	5	5	10	10	
9	6	10	11	18	22	15	7640	7	8	5735,0	38	53	62	77	24	0	6	8	FS	12	5	14	17	
10	7,8,9	11	23	30	45	32	4000	2	2	1888,0	78	110	78	110	0	1	6	9	SS	-4	5	15	-4	
11	10	16	22	28	39	29	4956	7	2	3071,0	105	134	105	134	0	1	7	10	FS	-2	10	32	8	
12	0	13	60	80	100	81	5128	7	0,2	3248,8	0	81	55	136	55	0	8	10	FS	5	14	32	19	
13	12	14	33	45	56	44	6618	7	0,7	4954,8	83	127	138	182	55	0	9	10	FS	1	15	32	16	
14	13	15	12	34	45	19	5230	5	0,5	4954,5	88	107	143	162	55	0	10	11	FS	-5	32	29	27	
15	14	16	13	16	22	17	7246	10	0,8	6844,8	74	91	129	146	55	0	11	16	FS	10	29	48	39	
16	11, 15	17	30	33	60	48	5974	5	0,8	3890,8	144	192	144	192	0	1	12	13	FS	2	81	44	83	
17	16	18 19	5	8	11	8	5361	9	9	4713,0	186	194	186	194	0	1	13	14	SS	5	44	19	5	
18	17	20	10	15	25	16	4542	10	8	2334,0	190	206	198	214	8	0	14	15	SF	3	19	17	-14	
19	17	20	13	17	19	16	3015	5	8	887,0	200	216	200	216	0	1	15	16	FS	-2	17	48	15	
20	18, 19		20	25	45	39	5899	9	1,4	3418,6	218	257	218	257	0	1	16	17	FS	-6	48	8	42	
											81732,3	Прямі витрати		257			17	18	FS	-4	8	16	4	
V ₀ = 12000											63400,0	Непрямі витрати		КШ			17	19	FS	6	8	16	14	
V ₁ = 200											145132,3	Загальні витрати				18	20	FS	4	16	39	20		
															19	20	FS	2	16	39	18			

Рис. 4. Результати

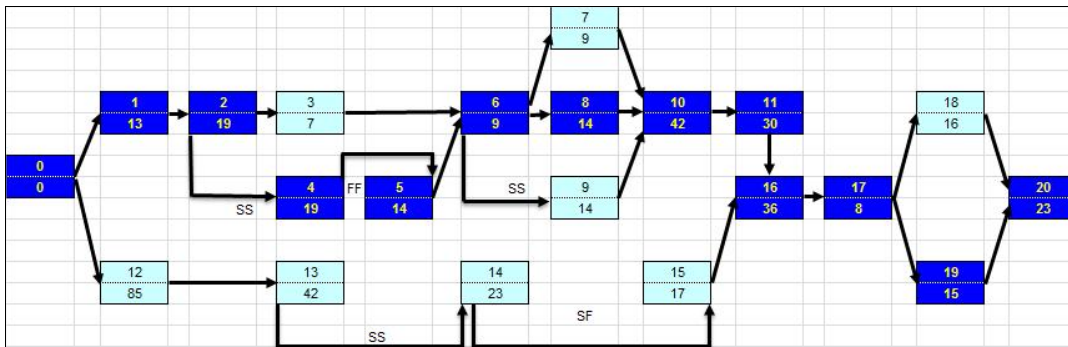


Рис. 5. Критичний шлях

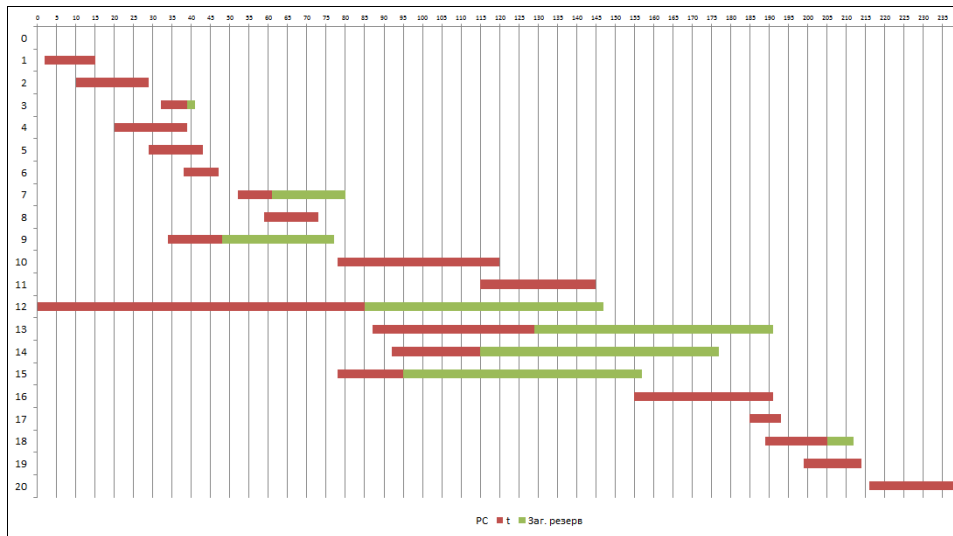


Рис. 6. Діаграма Гантта

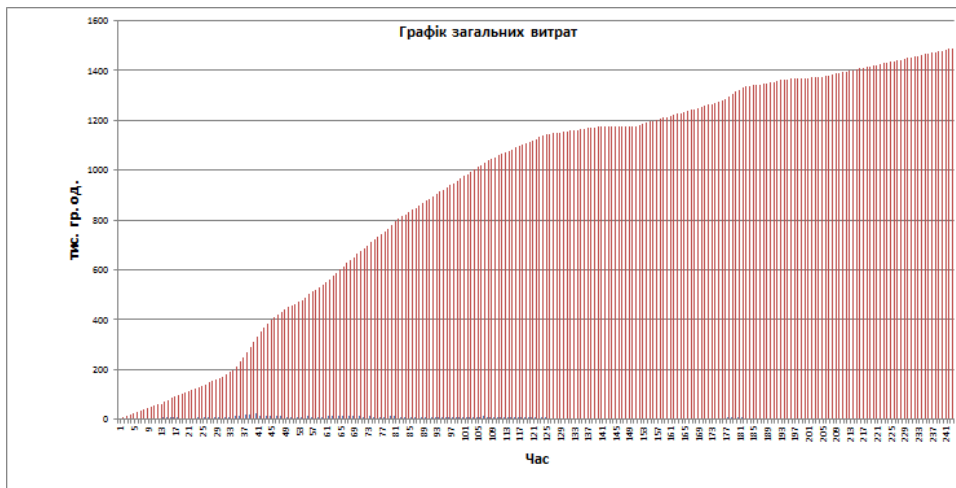


Рис. 7. Графік загальних витрат

Аналіз результату

Для одного з можливих варіантів указані:

- часові характеристики робіт;
- активні критичні роботи, автоматично виділяються кольором;
- мінімальна тривалість проекту (257 час. од.);
- вартісні оцінки, витрати: прямі, непрямі та загальні;
- на графіку автоматично виділяються критичні роботи;
- діаграма Гантта.

Оцінки ризиків

Частотний графік (Frequency) шуканого значення тривалості проекту (у час. од.) представляє розподіл імовірностей (рис. 8), відповідна статистика вказує на:

- повний діапазон значень (209÷275);
- 90,1-відсотковий діапазон значень (222÷260);
- середнє значення 240.

Ясно, що керуватися цим розподілом краще, ніж певним випадковим значенням (257) із цього діапазону.

Аналіз чутливості (Sensitivity) тривалості проекту вказує на силу (ймовірність) впливу тривалостей критичних робіт на його значення, перша найбільш впливова трійка це роботи: P-16, P-20 та P-10 (рис. 9).

Це означає, що серед усіх робіт увагу керівництва проекту привертають критичні роботи, а серед них — ті, що суттєво впливові на тривалість проекту, тобто, такі роботи найризикованіші та частіше за інші будуть належати критичному шляху, тож саме вони потребують сталої уваги. Таку оцінку неможливо отримати розв'язанням задачі традиційними методами.

Використаний інструментарій дає можливість отриманий частотний графік представити в аналітичній формі шляхом наближення (*Fit Distribution*) за певним критерієм узгодженості.

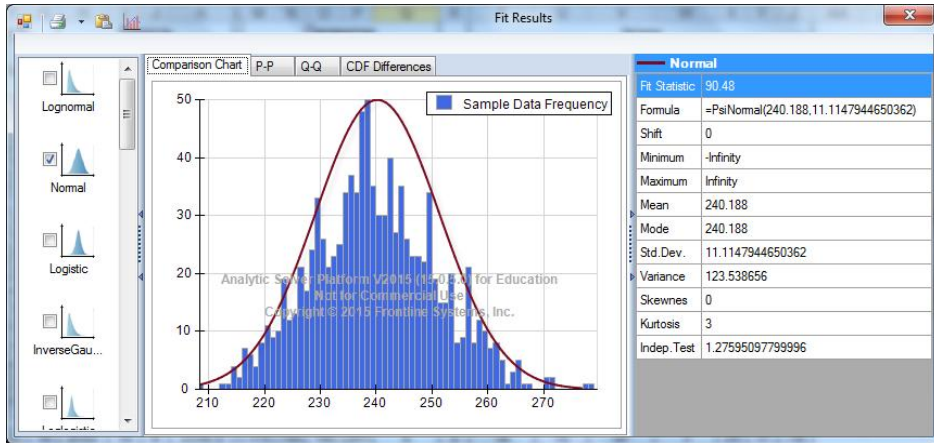


Рис. 8. Частотний графік

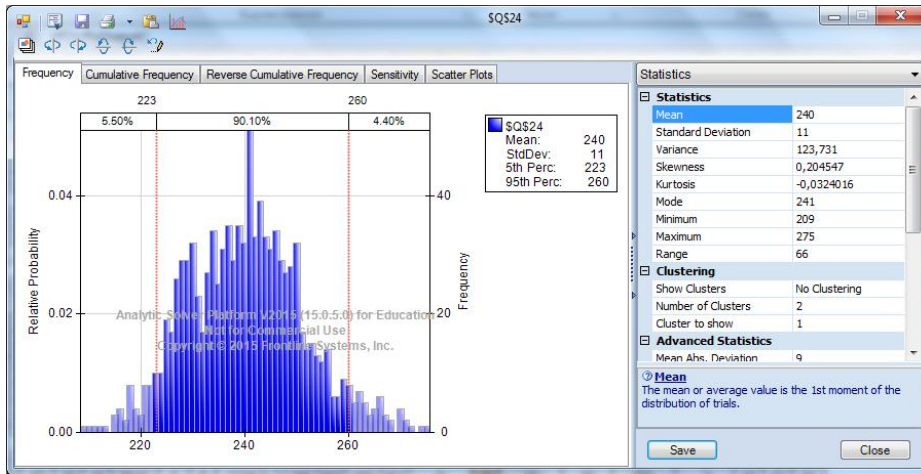


Рис. 9. Аналіз чутливості

На графіку функції імовірності тривалості проекту (рис. 10) добре видно, що $P(t_{kp} = 240) \approx 50\%$ у повному діапазоні значень (209÷275).

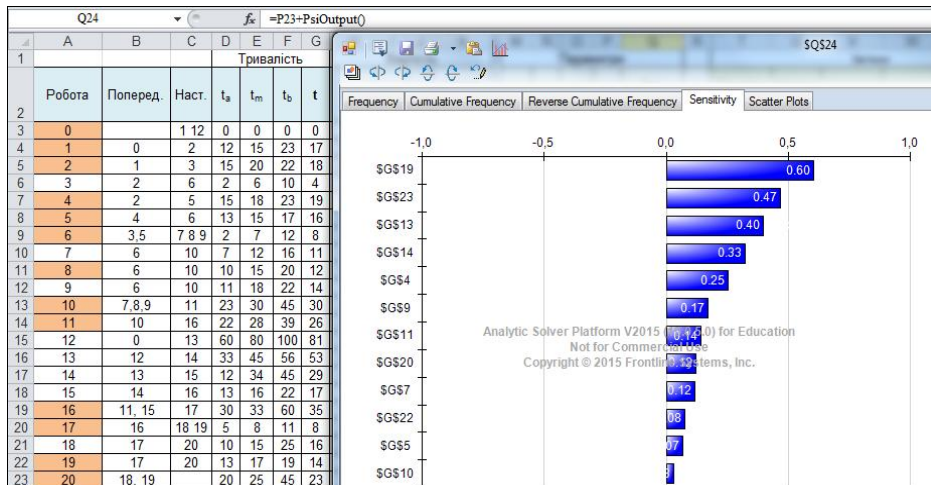


Рис. 10. Функція PsiNormal кращого наближення

Висновки

1. Експериментально підтверджено³, що, на відміну від традиційного підходу, маємо не одне число, а функцію нормального розподілу ймовірностей з відповідними аргументами: середнім (*Mean*) та середнім квадратичним відхиленням (*Std. Dev.*) PsiNormal (240,2; 11,1), отриману порівняльним аналізом результатів серії експериментів (5–10 тис. повторів), яка відповідає заданим початковим даним і яку тепер можна застосовувати як формулу в розрахунках, маючи основні дані про її властивості, без проведення експериментальних серій.

2. Аналогічним чином можна отримати функції нормального розподілу тривалості проекту задаванням різних розподілів імовірності тривалості робіт, де тривалість проекту коливається в межах 230÷253 час. од.

Розподіл для роботи	Розподіл для проекту
Рівномірний (Uniform)	PsiNormal (249,9; 15)
Pert	PsiNormal (230,7; 9,3)
Нормальний (Normal)	PsiNormal (253,8; 26,3)

3. Підтверджено продуктивність, універсальність і ефективність методології імітаційної оптимізації, яка дозволяє досліднику мати обґрунтовані кінцеві оцінки (часові та вартісні в проектах) для формування рішень, де найкращим чином враховується невизначена природа початкових даних, а остаточні оцінки базуються на порівняльному аналізі проміжних звітів, на пошуку та виборі оптимального варіанта, що здійснюється за допомогою пошукового алгоритму.

1. Кузьмичов А. І. Планування та управління проектами. Моделювання засобами MS Excel: Практикум. Київ: Вид-во Ліра-К, 2016. 180 с.

2. Ragsdale C. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. A Practical Introduction to Business Analytics. 7-th ed. Cengage Learn., 2015. 794 p.

3. Evans J. Business Analytics: Methods, Models, and Decisions. global ed. 2-d ed. Pearson, 2017. 653 p.

4. Powell S., Baker K. Management Science: The Art of Modeling with Spreadsheets. 4-th ed. Wiley, 2014. 539 p.

5. Gupta D. Risk Management and Simulation. CRC Press, 2014. 529 p.

6. Fu M. Handbook of Simulation Optimization. Springer, 2015. 400 p.

7. Optimization and Simulation User Guide. Frontline Solvers, Version 2016-R3. 454 p.

Надійшла до редакції 10.03.2017

³ Доведено, що незалежно від використаних розподілів тривалостей робіт, тривалість проекту завжди відповідає нормальному розподілу.