

DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.2.275103

УДК 004.942:621.311

А. І. Кузьмичов¹, Ю. В. Чернецька², В. А. Шестаков^{2,3}

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. М. Шпака, 2, 02113 Київ, Україна; e-mail: akuzmichov@gmail.com

²Інститут енергозбереження та енергоменеджменту «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Проспект Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна; e-mail: j.chernetska-ieee@iik.kpi.ua

³Товариство з обмеженою відповідальністю «Енерджі Маркетс Ассістант»

вул. Кудрявська, 9-Б, 04053 Київ, Україна

e-mail: vladyslav.shestakov.info@gmail.com

Пошук і аналіз чутливості часових оптимальних планів постачання енергетичних ресурсів із застосуванням надбудови SolverTable

Розглянуто проблематику практичного застосування оптимізаційного моделювання для задач енергетичного менеджменту. Запропоновано підхід до формування оптимізаційної моделі розподілу ресурсу у середовищі Excel, що враховує фактор часу, адже енергоспоживання має значну нерівномірність протягом доби, тижня, року, і відповідно рішення щодо оптимального плану постачання енергетичних ресурсів приймаються на підставі прогнозованих обсягів їхнього споживання у наступних часових періодах і з урахуванням особливостей функціонування джерел енергії. Для аналізу чутливості часових оптимальних планів до зміни вхідних даних моделі застосовано спеціалізовану надбудову SolverTable, що доповнює функціонал стандартної надбудови Розв'язувач (Excel Solver) і допомагає в інтерпретації результатів багаторазових обчислювальних експериментів для прийняття раціональних управлінських рішень. Модель апробовано на реальних даних для визначення оптимального плану закупівлі електричної енергії, у публікації наведено ілюстративний приклад.

Ключові слова: електронно-табличне моделювання, оптимізаційне моделювання, моделювання розподілу ресурсу, аналіз чутливості, Solver Table, Розв'язувач (Excel Solver), енергетичний менеджмент.

Вступ

Будь-яка модель оптимізаційної задачі організаційного управління, у прикладі, енергетичного менеджменту, має бути вдосконалена для об'єктивного врахування реального стану в суспільстві чи у певній галузі.

© А. І. Кузьмичов, Ю. В. Чернецька, В. А. Шестаков

У прикладі, що розглядається, мова йде про оптимізаційну модель розподілу ресурсу транспортного типу у складі аналітичного апарату математичного програмування, де створено ефективний інструментарій для прийняття рішень, як-от стандартна надбудова Розв'язувач (Excel Solver), яка багатократно застосовується для пошуку оптимальних планів та аналізу їхньої чутливості до зміни вхідних даних моделі.

1. Задача про пошук часових оптимальних планів

1.1. Особливості застосування алгоритмів транспортної задачі для моделювання розподілу енергетичних ресурсів

Типова та класична модель транспортної задачі має три складові (рис. 1): план (X), цільову функцію (ЦФ) та обмеження, де, зокрема, права частина системи ресурсних обмежень — вектор (стовпець), що дозволяє різні варіанти розподілу однорідного ресурсу окремого постачальника між споживачами. Критерій оптимізації ЦФ — мінімум витрат, що пов'язані з обслуговуванням споживачів; порядок споживачів у табличній моделі довільний.

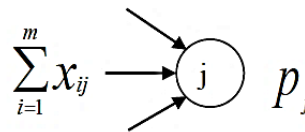
Задача оптимізації

I. Знайти матрицю транспортних потоків $X = \{x_{ij}\}$, де x_{ij} — величина потоку від i -го постачальника до j -го споживача, $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$, щоб

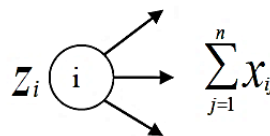
II. ЦФ Загальні витрати (ткм) $V = CX = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$

III. за обмежень:

1) для споживачів: $\sum_{i=1}^m x_{ij} = p_j$ (Ввезено = Попит, в т)



2) для постачальників: $\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq z_i$ (Вивезено \leq Запас, в т)



та граничних умов: усі $x_{ij} \geq 0$.

Рис. 1. Класична модель транспортної задачі [2]

Застосування алгоритмів транспортної задачі для моделювання розподілу енергетичних ресурсів потребує врахування наступних особливостей:

1) споживання енергетичних ресурсів є нерівномірним у часі — потреби споживачів суттєво змінюються протягом доби, у вихідні та робочі дні тижня, у розрізі сезонів року. Проте зазначені зміни є досить прогнозованими, і рішення щодо постачання енергетичних ресурсів приймаються саме на підставі прогнозованих значень;

2) енергетичні ресурси мають бути представлені як однорідний продукт, тому необхідно або розглядати розподіл різних енергетичних ресурсів окремо, або переходити до умовних одиниць енергетичних ресурсів;

3) роль «постачальників» транспортної задачі виконують джерела енергії з відмінними технічними характеристиками, що створює додаткові обмеження;

4) попит споживачів може бути агрегованим у межах визначених інтервалів часу;

5) система розподілу енергетичних ресурсів переважно має мережеву конфігурацію, з проміжними організаційними одиницями, які узагальнюють попит споживачів, отримують і перерозподіляють енергетичні потоки, що супроводжується відповідними витратами;

6) питомі витрати на розподіл одиниці продукту можуть залежати не лише від відстані між джерелом і споживачем, а й від типу джерела енергії, цінової політики власників джерел енергії і тарифної політики в державі;

7) критерій оптимізації, зазвичай — мінімум загальних витрат в інтересах споживачів, хоча можливі й інші варіанти, як-от шуканий оптимальний план за фіксованим значенням ЦФ, у межах заданого бюджету.

1.2. Структура та складові електронно-табличної моделі на прикладі задачі визначення часових оптимальних планів постачання електричної енергії

Враховуючи зазначені особливості, розглянемо структуру та складові електронно-табличної моделі оптимального розподілу ресурсу для задачі пошуку оптимального плану постачання електричної енергії.

Задача розв'язується в інтересах постачальника електричної енергії, що згідно з укладеними договорами забезпечує потреби 250-ти споживачів електричної енергії — юридичних осіб, географічно розташованих у різних областях України. Зокрема, постачальник щодня здійснює закупівлю електричної енергії на ринку на добу наперед, орієнтуючись на погодинні потреби споживачів та відповідні пропозиції джерел енергії. Мета — визначити такий часовий план закупівлі електричної енергії, при якому сумарні витрати постачальника будуть мінімальними.

Система розподілу електричної енергії має мережеву конфігурацію, що дозволяє використовувати матричну чи мережеву модель транспортної задачі. Проміжними організаційними одиницями є оператори систем розподілу електричної енергії, які отримують і перерозподіляють потоки електричної енергії до споживачів у межах території здійснення ліцензійної діяльності, що супроводжується відповідними витратами.

Цінову політику визначають власники джерел енергії, враховуючи технологічні ліміти генеруючих потужностей і витрати на вироблення електричної енергії в обсягах, що необхідні споживачам у наступних часових періодах.

Для врахування фактору часу, часовий горизонт розділяють на окремі характерні періоди, у числовому прикладі їх 12, постачальник узагальнює попит споживачів у кожний часовий період, утворюючи відповідно умовних споживачів, розташованих у строго фіксованому порядку.

Часовий порядок формування моделі також визначає представлення системи ресурсних обмежень, бо джерела енергії надають свої пропозиції не одним значенням, як у класичній транспортній моделі, а по строго визначеним періодам відповідною матрицею пропозицій.

Модель формує оптимальний план, якщо попит споживачів у часові періоди узгоджено із відповідними пропозиціями/лімітами джерел енергії, які є основними

обмеженнями на значення шуканого плану, інші обмеження стосуються даних витрат (цінової політики).

1.3. Числовий приклад визначення часових оптимальних планів постачання електричної енергії

Розглянемо числовий приклад реалізації зазначеної моделі, використовуючи можливості електронно-табличного моделювання у середовищі Excel. Кількісні значення в даному випадку мають ілюстративний характер.

Горизонт планування складається із часових періодів $t_1 \dots t_{12}$, які визначають структуру моделі числом стовпців усіх таблиць. У прикладі три джерела енергії — виробники, які продають електричну енергію (Дж1 ... Дж3) та п'ять споживачів електричної енергії (Сп1 ... Сп5). За вказаними часовими періодами задано матриці відповідних розмірів, але усі мають 12 стовпців (рис. 2).

	В	С	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
32	Попит споживачів											
33		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11
34	Сп1	44	41	26	37	33	26	31	22	32	17	3
35	Сп2	23	25	28	35	31	38	20	37	22	31	3
36	Сп3	19	37	31	30	23	31	32	4	22	21	3
37	Сп4	12	14	4	5	33	13	26	40	31	31	2
38	Сп5	28	13	12	45	24	23	16	32	20	31	4
39	Сума	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	17

а)

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
2	Пропозиції (Ліміти споживання)										
3		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
4	Дж1	46	79	32	71	80	65	70	63	44	31
5	Дж2	64	34	40	54	61	77	34	36	59	64
6	Дж3	62	69	30	31	38	67	72	37	78	68
7		172	182	102	156	179	209	176	136	181	163

б)

	A	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
14		Питомі витрати									
15		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
16	Сп1	1.8	1	1.6	1.7	1.9	1	0.6	1.8	1.5	0.2
17		1.8	1.8	0.4	0.6	1.5	0.7	0.1	1.2	1.8	1.9
18		1.7	1.1	0.4	0.1	0.4	1	1.3	0.9	0.9	1.8
19	Сп2	0.4	1.2	0.6	2.6	1.6	2.3	1.8	2.7	0.4	2.1
20		0.7	2.7	2.9	0.9	2.8	1	0.2	1.4	2.3	0.5
21		3	1.8	1.8	0.5	0.4	0.3	1.4	2.6	0.2	0.5
22	Сп3	1.5	2.6	0.4	0.8	1.4	2.7	4	2.7	3.2	3.6
23		3.3	0.9	1.7	0.9	2.5	0.4	2.7	0	3.7	3.8
24		1.8	1.8	3	3.3	0.3	3.8	2.4	0.5	3.6	3.9
25	Сп4	3.2	1.6	3	2.2	4.6	2.2	4.5	2.1	3.4	1.3
26		2.8	4.8	0.2	4.9	3.6	3	0.6	3.8	2.1	0.9
27		4.8	5	3.3	2.6	2.4	2.9	2	1.3	1.5	1.7
28	Сп5	1.6	2.6	4.9	5.3	5	1.9	3.2	0.1	3.5	0.5
29		2.6	2.4	3.8	2.1	5.7	5.4	5.8	3.2	3.5	3.8
30		1.8	3.4	5.4	2.5	5	0.7	1	0.5	2.8	1.9

в)

Рис. 2. Початкові дані: а) попит, P; б) пропозиції, Z; в) питомі витрати, C

Для пошуку рішення за допомогою стандартної надбудови Розв'язувач (Excel Solver) виділимо поля шуканих значень (рис. 3): план X (діапазон значень C16:N30) — матриця потоків до споживачів; ЦФ (комірка A9) — сума значень у стовпці Оплата (діапазон значень A4:A8), який є сумою добутків питомих витрат C на потоки до кожного окремого споживача; обмеження щодо балансу обсягів вироблення-споживання електричної енергії — Спожито (діапазон значень C4:N8) дорівнює попиту P; обмеження щодо лімітів джерел енергії — потоки від джерел (діапазон значень Q9:AV11) не перевищують пропозиції Z.

За заданими пропозиціями вдалося отримати оптимальний часовий план X (рис. 4). Знайдені потоки ресурсу забезпечать мінімальні витрати на закупівлю електричної енергії, відповідно до попиту споживачів та з урахуванням технологічних лімітів джерел, за часовими періодами.

«Вузьким» місцем виявилися пропозиції у діапазоні S4:S6 в періоді t3, використані повністю, тобто, збільшення попиту у цей період неможливе, це предмет наступного аналізу.

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Часові потоки ресурсу													14	Потоки до споживачів												
2	Спожито													15	Потоки до споживачів												
3	Оплата	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	16	Дж1	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	Дж2												
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	Дж3												
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	Дж1												
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	Дж2												
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	Дж3												
9	0.0	Сума	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	Дж1												
10	ЦФ	Попит	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	1	23	Дж2											

а)

▲	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
8	Потоки від джерел												
9	Дж1												
10	Дж2												
11	Дж3												
12	Сума	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Резерв	46	52	1	4	35	78	51	1	54	32	8	55

б)

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
14	Потоки до споживачів												
15	Потоки до споживачів												
16	Дж1	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
17	Дж2												
18	Дж3												
19	Дж1												
20	Дж2												
21	Дж3												
22	Дж1												
23	Дж2												
24	Дж3												
25	Дж1												
26	Дж2												
27	Дж3												
28	Дж1												
29	Дж2												
30	Дж3												

в)

Рис. 3. Поля шуканих значень: а) Спожито, вектор Оплата та клітинка ЦФ; б) Потоки від джерел; в) Потоки до споживачів

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	C	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1	Часові потоки ресурсу													Пропозиції (Ліміти споживання)														
2	Спожито													Пропозиції (Ліміти споживання)														
3	Оплата	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	Дж1	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12		
4	385,7	44	41	26	37	33	26	31	22	32	17	35	19	Дж1	46	79	31	71	80	65	70	63	44	31	63	53		
5	341,5	23	25	28	35	31	38	20	37	22	31	32	12	Дж2	64	34	40	54	61	77	34	36	59	64	56	49		
6	380,8	19	37	31	30	23	31	32	4	22	21	39	44	Дж3	62	69	30	31	38	67	72	37	78	68	62	76		
7	412,2	12	14	4	5	33	13	26	40	31	31	26	14		172	182	101	156	179	209	176	136	181	163	181	178		
8	485,7	28	13	12	45	24	23	16	32	20	31	41	34	Потоки від джерел														
9	2005,9	Сума	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	123	Дж1	46	79	31	67	73	13	31	62	44	31	63	19	
10	ЦФ	Попит	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	123	Дж2	18	34	40	54	33	57	34	36	5	64	48	49	
11															Дж3	62	17	30	31	38	61	60	37	78	36	62	55	
12															Сума	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	123	
13															Резерв	46	52	0	4	35	78	51	1	54	32	8	55	
14	Потоки до споживачів													Питомі витрати														
15	Потоки до споживачів													Питомі витрати														
16	Дж1	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	16	1,8	1	1,6	1,7	1,9	1	0,6	1,8	1,5	0,2	1,2	0,5		
17	Дж2	0	27	0	32	0	0	31	0	0	17	19	19	17	1,8	1,8	0,4	0,6	1,5	0,7	0,1	1,2	1,8	1,9	2	0,6		
18	Дж3	38	14	2	5	0	0	0	22	32	0	0	0	18	1,7	1,1	0,4	0,1	0,4	1	1,3	0,9	0,9	1,8	1,3	1,9		
19	Дж1	23	25	0	0	26	0	0	5	22	0	0	0	19	0,4	1,2	0,6	2,6	1,6	2,3	1,8	2,7	0,4	2,1	2,2	1,7		
20	Дж2	0	0	0	0	9	0	0	8	32	0	12	32	12	0,7	2,7	2,9	0,9	2,8	1	0,2	1,4	2,3	0,5	2,3	0,1		
21	Дж3	0	0	28	26	5	38	12	0	0	19	0	0	13	3	1,8	1,8	0,5	0,4	0,3	1,4	2,6	0,2	0,5	2,5	2,4		
22	Дж1	19	0	31	30	23	0	0	0	22	0	0	0	14	1,5	2,6	0,4	0,8	1,4	2,7	4	2,7	3,2	3,6	3,2	1,8		
23	Дж2	0	34	0	0	0	0	31	0	4	0	21	0	15	3,3	0,9	1,7	0,9	2,5	0,4	2,7	0	3,7	3,8	2,6	0,6		
24	Дж3	0	3	0	0	0	0	32	0	0	0	39	44	16	1,8	1,8	3	3,3	0,3	3,8	2,4	0,5	3,6	3,9	0,1	0,1		
25	Дж1	0	14	0	5	0	13	0	25	0	0	3	0	17	3,2	1,6	3	2,2	4,6	2,2	4,5	2,1	3,4	1,3	2,6	4,5		
26	Дж2	12	0	4	0	0	0	26	0	5	31	0	3	18	2,8	4,8	0,2	4,9	3,6	3	0,6	3,8	2,1	0,9	4,7	1,3		
27	Дж3	0	0	0	0	33	0	0	15	26	0	23	11	19	4,8	5	3,3	2,6	2,4	2,9	2	1,3	1,5	1,7	1,6	2,1		
28	Дж1	4	13	0	0	24	0	0	32	0	14	41	0	20	1,6	2,6	4,9	5,3	5	1,9	3,2	0,1	3,5	0,5	0,2	1,6		
29	Дж2	0	0	12	45	0	0	0	0	0	0	0	34	21	2,6	2,4	3,8	2,1	5,7	5,4	5,8	3,2	3,5	3,8	3,4	0,1		
30	Дж3	24	0	0	0	0	23	16	0	20	17	0	0	22	1,8	3,4	5,4	2,5	5	0,7	1	0,5	2,8	1,9	3	3,6		
31	Попит споживачів													Питомі витрати														
32	Попит споживачів													Питомі витрати														
33	Попит споживачів													Питомі витрати														
34	Сп1	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	34	44	41	26	37	33	26	31	22	32	17	35	19		
35	Сп2	23	25	28	35	31	38	20	37	22	31	32	12	35	23	25	28	35	31	38	20	37	22	31	32	12		
36	Сп3	19	37	31	30	23	31	32	4	22	21	39	44	36	19	37	31	30	23	31	32	4	22	21	39	44		
37	Сп4	12	14	4	5	33	13	26	40	31	31	26	14	37	12	14	4	5	33	13	26	40	31	31	26	14		
38	Сп5	28	13	12	45	24	23	16	32	20	31	41	34	38	28	13	12	45	24	23	16	32	20	31	41	34		
39	Сума	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	123	41	Сума	126	130	101	152	144	131	125	135	127	131	173	123	

Рис. 4. Оптимальний план постачання електричної енергії

2. Аналіз чутливості знайдених часових оптимальних планів

Аналіз чутливості знайденого оптимального плану до зміни вхідних даних моделі в оптимізаційному моделюванні надзвичайно важливий [1], тому треба розуміти плюси та мінуси двох засобів для цього: звіту про стійкість, що є доповненням до рішення у надбудові Розв'язувач, та спеціалізованої надбудови SolverTable.

2.1. Аналіз чутливості за звітом про стійкість надбудови Розв'язувач

У звіті про стійкість отримано два типи двоїстих оцінок впливовості вхідних даних на значення ЦФ: «тіньова ціна» (shadow price) та «зменшена вартість» (reduce cost). «Тіньова ціна» є оцінкою впливовості правих частин обмежень ЦФ.

Як бачимо з табл. 1, зростання попиту будь-якого зі споживачів на 1 призведе до збільшення ЦФ (загальних витрат) на вказану кількість одиниць, при цьому більше значення коефіцієнту в табл. 1 означає більш суттєвий вплив вхідного значення на ЦФ.

Таблиця 1. «Тіньова ціна» попиту споживачів за часовими періодами, гр. од.

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Сп1	1,8	1,1	0,4	1,7	1,5	0,7	0,6	1,7	1,5	1,6	2	0,5
Сп2	0,7	1,3	1,8	2,1	1,6	0,3	1,4	2,7	0,4	0,5	2,3	0,9
Сп3	1,8	1,8	1,6	0,8	1,4	0,4	2,4	1,3	3,2	3,8	1,9	0,1
Сп4	2,8	1,7	0,2	2,2	3,6	2,2	1,8	2,1	2,1	0,9	3,4	2,1
Сп5	1,9	2,7	3,8	3,3	5	0,7	1	0,1	3,4	1,9	1	0,9

У табл. 2 представлено «тіньові ціни» для технологічних лімітів джерел. Зростання усіх заданих пропозицій з оцінкою (< 0) на 1 призведе до зменшення ЦФ на цю величину. Наприклад, двоїста оцінка пропозиції Дж1 у період t3 (31) зі значенням $(-1,2)$ означає, що при збільшенні пропозиції до 32, значення ЦФ зменшиться на 1,2.

Таблиця 2. «Тіньова ціна» лімітів джерел енергії за часовими періодами, гр. од.

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Дж1	-0,3	-0,1	-1,2	0	0	0	0	0	0	-1,4	-0,8	0
Дж2	0	-0,9	0	-1,2	0	0	-1,2	-1,3	0	0	0	-0,8
Дж3	-0,1	0	0	-1,6	-1,2	0	0	-0,8	-0,6	0	-1,8	0

«Зменшена вартість» показує на скільки погіршиться значення ЦФ при відхиленні плану від знайденого оптимуму.

У табл. 3 наведено частину значень звіту про стійкість, що показують «зменшену вартість» потоків до споживача Сп1. Якщо вольовим рішенням одиницю потоку направити у «нульову» клітинку С16 (Дж1, t1) (див. рис. 4), то значення ЦФ погіршиться, збільшившись не менше, ніж на 0,3 гр. од.

Таблиця 3. «Зменшена вартість» потоків до Сп1 за часовими періодами, гр. од.

		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Сп1	Дж1	0,3	0	2,4	0	0,4	0,3	0	0,1	0	0	0	0
	Дж2	0	1,6	0	0,1	0	0	0,7	0,8	0,3	0,3	0	0,9
	Дж3	0	0	0	0	0,1	0,3	0,7	0	0	0,2	1,1	1,4

2.2. Аналіз чутливості з використанням SolverTable

Надбудова SolverTable, розроблена заслуженим професором Університету Індіани (США) Крістіаном Олбрайтом (Cristian Albright) та доступна для безкоштовного завантаження на сайті автора [5], призначена саме для здійснення аналізу чутливості вже створеної оптимізаційної моделі Розв'язувача. Дає можливість розглядати два види змінюваних сценаріїв «аргументи-функції»:

1) «з одним входом» (Oneway table) — за заданим стовпцем змінюваних значень аргументу розраховується декілька стовпців функцій одного аргумента;

2) «з двома входами» (Twoway table) — за заданими стовпцем і рядком змінюваних аргументів розраховуються одна чи декілька матриць значень функцій двох аргументів.

Розглянемо обидва види змінюваних сценаріїв SolverTable, дослідивши передусім діапазон S4:S6 — критичні пропозиції трьох джерел у періоді t3 (рис. 4).

2.2.1. Аналіз чутливості для сценаріїв «з одним входом»

Запит 1: як вплине збільшення технологічного ліміту Дж1 у періоді t3 (аргумент у комірці S4, 31) від заданого значення 31 до 40 з кроком 1 на зміну обчислених значень оплати для 5 споживачів (діапазон значень A4:A8) і на значення ЦФ.

Результат SolverTable: збільшення даного ліміту забезпечує зменшення значення ЦФ у діапазоні 2005,9 ÷ 1995,1 гр. од. і, здається, обіцяє ще зменшитися.

Запит 2: як вплине подальше збільшення технологічного ліміту Дж1 у періоді t3 (аргумент у комірці S4, 31) від значення 31 до 67 з кроком 3 на зміну обчислених значень оплати для 5 споживачів і на значення ЦФ.

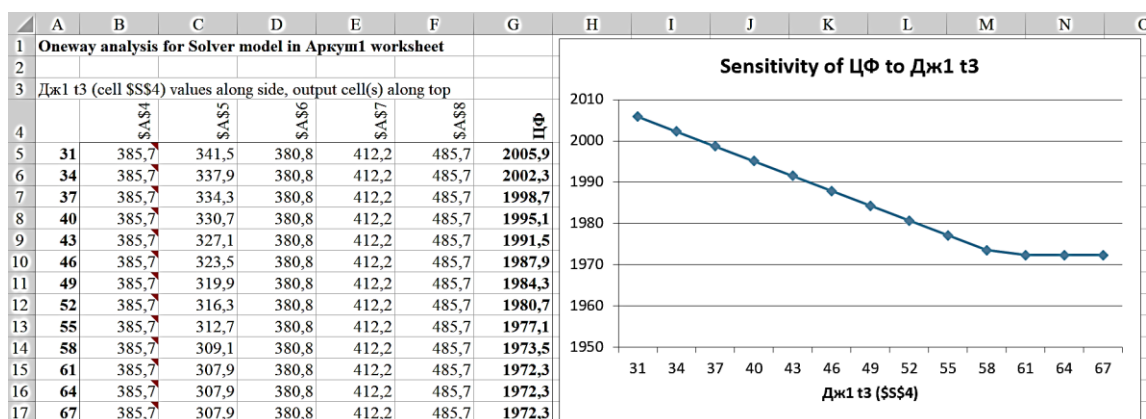
Результат SolverTable: як бачимо на рис. 5,а, значення ЦФ спочатку продовжує зменшуватись, а при ліміті 61 од. і більше — не змінюється, залишаючись рівним 1972,3 гр. од. Також можемо зробити висновок, що оплата споживачів Сп1, Сп3-Сп5 (комірки A4, A6-A8) залишиться без змін, оплата споживача Сп2 (комірка A5) зменшиться до 307,9 гр. од.

Запит 3: як вплине зміна заданого технологічного ліміту Дж2 у періоді t3 (аргумент у комірці S5, 40) від значення 35 до 45 з кроком 1 на зміну обчислених значень оплати для 5 споживачів і на значення ЦФ.

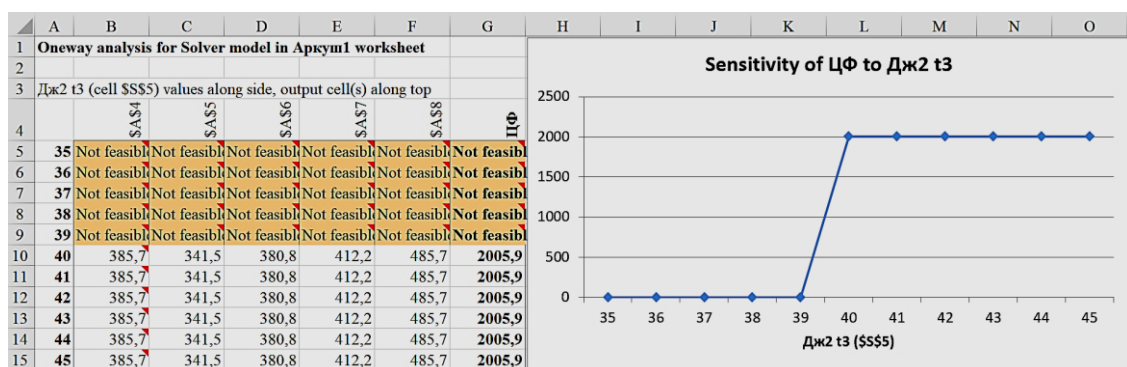
Результат SolverTable: як бачимо на рис. 5,б, при ліміті менше заданого значення 40 задача не має допустимих розв'язків; збільшення ліміту не впливає на значення ЦФ.

Запит 4: як вплине зміна заданого технологічного ліміту Дж3 у періоді t3 (аргумент у комірці S6, 30) від значення 25 до 35 з кроком 1 на зміну обчислених значень оплати для 5 споживачів і на значення ЦФ.

Результат SolverTable: результат аналогічний запиту 3, зміна вхідного значення не призводить до зменшення значення ЦФ, тобто не покращує результат.



а)



б)

Рис. 5. Аналіз чутливості в SolverTable для сценаріїв «з одним входом»: а) запит 2; б) запит 3

2.2.2. Аналіз чутливості для сценаріїв «з двома входами»

Запит 5: як вплине одночасна зміна технологічних лімітів двох джерел у періоді t3: Дж1 (аргумент у комірці S4, 31) від значення 31 до 41 з кроком 2 та Дж2 (аргумент у комірці S5, 40) від значення 40 до 50 з кроком 2, на зміну обчислених значень оплати для 5 споживачів і на значення ЦФ.

Результат SolverTable: одержаний результат практично не відрізняється від результатів запитів 1–4, бо на значення ЦФ впливає лише зміна ліміту Дж1.

Запит 6: як вплине зміна попиту споживача Сп1 одночасно у двох періодах: t1 (аргумент у комірці C34, 44) від значення 30 до 60 з кроком 5 та t6 (аргумент у комірці N34, 26) від значення 15 до 40 з кроком 5, на зміну оплати для цього споживача і на значення ЦФ.

Результат SolverTable: оплата споживача, в цілому, пропорційна спожитому обсягу (див. графіки на рис. 6).

Табличні дані дають більше інформації з точки зору задач енергетичного менеджменту: одночасне зменшення споживання у періоді t1 до 30 та у періоді t6 до 15 дозволить зменшити оплату споживача Сп1 на 32,1, тобто до 353,6, порівняно зі значенням 385,7, яке відповідає оптимальному плану постачальника. При цьому

значення ЦФ зменшиться на таку ж величину, до 1973,8, порівняно із оптимумом у 2005,9, тобто при заданих числових параметрах моделі, у постачальника немає фінансових стимулів залучати Сп1 до управління попитом на електричну енергію.

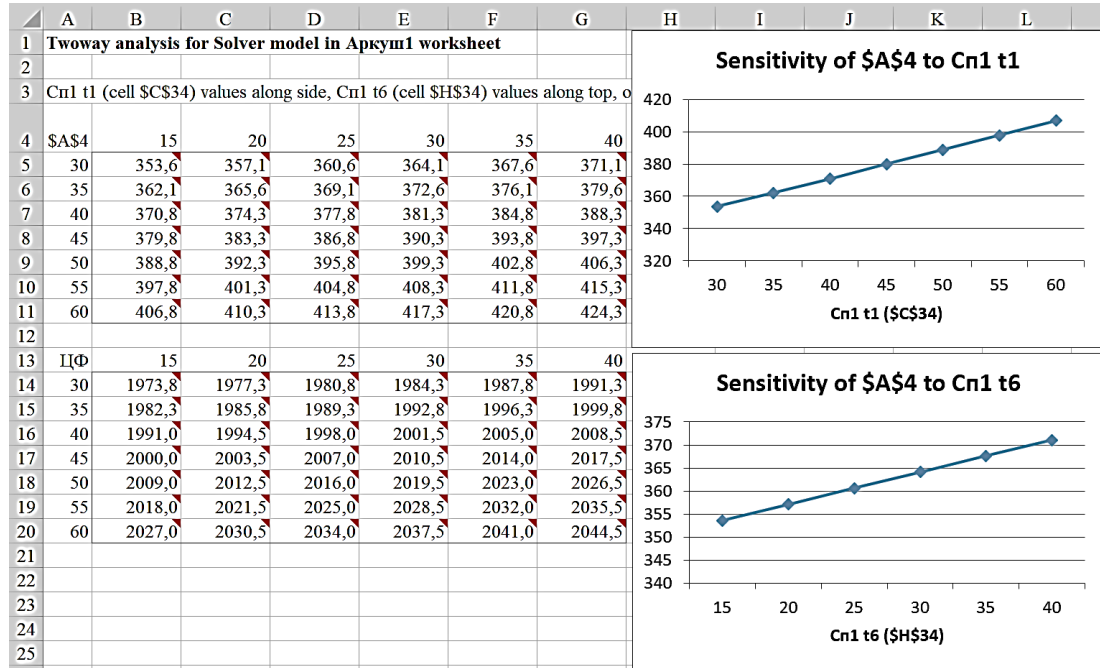


Рис. 6. Аналіз чутливості в SolverTable для сценарію «з двома входами» (запит 6)

2.3. Переваги застосування надбудови SolverTable

Розглянувши обидва інструменти для аналізу чутливості, можемо виділити наступні переваги застосування надбудови SolverTable, порівняно із використанням звіту про стійкість надбудови Розв'язувач (далі — звіт):

- звіт стосується лише оцінювання наслідків зміни коефіцієнтів ЦФ і правої частини обмежень, тоді як SolverTable дозволяє змінювати будь-які вхідні дані і отримувати значно більше інформації;

- звіт базується на зміні лише одного коефіцієнта ЦФ або одного значення правої частини обмежень за один раз. SolverTable дещо гнучкіший і дозволяє аналізувати вплив змінюваної пари входів;

- звіт базується на якісно визначеній математичній теорії про двоїстість у лінійному програмуванні, у разі послабленої математичної підготовки користувача отримані двоїсті оцінки коефіцієнтів можуть бути складними для розуміння. У той же час, результати SolverTable є досить зрозумілими, змінюючи один або два входи, безпосередньо видно зміни обчислених складових оптимального рішення;

- звіт недоступний для цілочисельних лінійних моделей, а інтерпретація двоїстих оцінок для нелінійних моделей складніша, ніж для лінійних моделей. Результати SolverTable мають однакову інтерпретацію для будь-якого класу моделі оптимізації.

Висновки

Запропонований підхід дозволяє в доступному середовищі Excel здійснити досить важливий для прийняття раціональних рішень аналіз чутливості оптимального плану до зміни будь-яких вхідних даних оптимізаційної моделі із використанням безкоштовної надбудови SolverTable.

Оптимальні плани в часовому вимірі дозволяють відтворювати динаміку організаційних та технологічних процесів, що особливо важливо для задач енергетичного менеджменту, адже і споживання енергетичних ресурсів має значну нерівномірність у часі, і джерела енергії можуть мати технологічні обмеження, що пов'язані з фактором часу.

Розглянуто ілюстративний приклад визначення часового оптимального плану постачання електричної енергії, проте розроблена модель може бути модифікованою для вирішення інших задач оптимального розподілу енергетичних ресурсів.

Розробку впроваджено до освітнього процесу кафедри електропостачання «КПІ імені Ігоря Сікорського» та використано компанією-постачальником електричної енергії.

1. Derhy M.-F. Linear Programming, Sensitivity Analysis and Related Topics. Pearson, 2010. 465 p.
2. Кузьмичов А.І. Оптимізаційне моделювання в MS Excel. Київ: ІПІ НАН України, 2017. 433 с.
3. Albright C., Winston W. Business Analytics. Data Analysis and Decision Making, 7-ed. Cengage, 2020. 914 p.
4. Ragsdale C. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. A Practical Introduction to Business Analytics, 9-ed. Cengage, 2022. 908 p.
5. Персональний сайт розробника надбудови SolverTable Крістіана Олбрайта (Cristian Albright). Albright, Winston Textbooks. URL: www.kelley.iu.edu/albrightbooks

Надійшла до редакції 07.12.2022