

УДК 519.816

**В. В. Циганок**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

### **Удосконалення методу цільового динамічного оцінювання альтернатив та особливості його застосування**

*Запропоновано удосконалення методу цільового динамічного оцінювання альтернатив, який застосовується для визначення рейтингів проектів на основі експертних баз знань у системах підтримки прийняття рішень. До найважливіших удосконалень методу слід віднести: визначення груп сумісності цілей за більш ефективним алгоритмом; визначення доцільного інтервалу планування для кожної сформованої бази знань разом з визначенням множини реперних точок часової шкали для подальшого обчислення рейтингів проектів для утворених часових проміжків; надання можливості динамічного оцінювання альтернатив стосовно будь-якої (не лише головної) цілі; врахування часткового виконання проектів; визначення інтегрального показника відносної ефективності проектів. Удосконалення методу служать для підвищення його ефективності та функціональності і дозволяють ширше практично застосовувати метод у сучасних системах підтримки прийняття рішень.*

**Ключові слова:** підтримка прийняття рішень, метод цільового динамічного оцінювання альтернатив, групи сумісних цілей, інтегральний показник відносної ефективності проектів.

#### **Вступ**

Метод цільового динамічного оцінювання альтернатив (МЦДОА) [1] призначений для оцінювання альтернатив (варіантів рішень, проектів) на інтервалі часу в системах підтримки прийняття рішень (СППР). Оцінювання здійснюється, базуючись на побудованій експертним шляхом моделі предметної області. Метод дає змогу використовувати найбільш загальні моделі слабкоструктурованих предметних областей, що достатньою мірою повно та адекватно відображають особливості тієї, чи іншої предметної області. Моделі, у даному випадку, являють собою бази знань (БЗ) — ієрархії цілей, які зручно зображаються у вигляді зв'язного орієнтованого графа. Вершинам графа відповідають сформульовані експертами цілі, а дуги зображують наявні взаємозв'язки між ними. Серед цілей зазвичай виділяють

головну ціль проблеми (кореневу вершину графа), проміжні цілі, а також проекти (термінальні вершини графа, цілі нижнього рівня ієрархії). Задля досягнення найбільшої адекватності моделі до предметної області та щоб забезпечити можливість враховувати динаміку зміни відносних оцінок альтернатив у часі, дуги графа навантажені величинами часових затримок впливів, визначених експертним шляхом.

Порівняно з іншими існуючими методами, наприклад, багатокритеріальними [2], де знаходять застосування відповідні методи оптимізації [3], МЦДОА дозволяє проводити оцінювання різнорідних проектів, для яких важко, або неможливо сформулювати єдину множину критеріїв. Окрім того, МЦДОА не потребує від експерта володіти всією проблемою у цілому, а дозволяє до побудови моделі залучати групи експертів, кожна з яких має повні знання лише стосовно деякої частини предметної області. Завдяки згаданим властивостям, МЦДОА можна позиціонувати як один із основоположних методів у галузі експертної підтримки прийняття рішень.

Метод полягає у виконанні ряду процедур із залученням експертів стосовно побудови БЗ предметної області з визначенням низки чисельних параметрів щодо ступенів впливу цілей, затримок розповсюдження впливів, тривалості виконання проектів тощо. Коли побудову БЗ — ієрархії цілей завершено, метод дає змогу розрахувати рейтинги (оцінки) варіантів рішень на основі БЗ.

У даній статті, з метою розширення можливостей МЦДОА для практичного застосування в СППР, пропонуються ряд удосконалень і модифікацій, про які піде мова у ході опису роботи, та можливостей цього методу.

## Побудова експертами ієрархії цілей

Процес побудови починається з формулювання головної цілі проблеми та можливих варіантів її вирішення, які зрештою потрібно оцінити. Головна ціль підлягає декомпозиції на більш прості складові — цілі, що впливають на головну ціль. У подальшому ці сформульовані цілі також підлягають декомпозиції. Причому до переліку цілей, що впливають на досягнення поточної цілі, окрім щойно сформульованих цілей, можуть бути включені наявні у ієрархії (раніше сформульовані при декомпозиції інших цілей). Процес декомпозиції продовжується аж поки множини цілей, які впливають на цілі, що розкриваються, будуть складатися лише з варіантів рішень, що оцінюються, та уже розкритих цілей. Тобто процес декомпозиції зупиняється, коли не залишилося не розкритих цілей.

Ієрархія цілей, яку будують експерти, задається орієнтованим графом, вершини якого позначені формулюваннями цілей. Дуга у графі відповідає наявності впливу досягнення однієї цілі на досягнення іншої. Завдяки описаному процесу побудови ієрархії цілей, відповідний їй граф є одностороннім зв'язним, оскільки з будь-якої вершини графа існує шлях до вершини, що позначає головну ціль. Кожній вершині (цілі) поставлено у відповідність показник ступеня досягнення  $d_i \in \mathfrak{R}$ ,  $i \in [1..n]$ ,  $n$  — кількість цілей в ієрархії.  $0 \leq d_i \leq 1$ , причому  $d_i = 1$  при повному досягненні  $i$ -ї цілі, а  $d_i = 0$  — за відсутності будь-якого процесу в її досягненні. Слід зазначити, що кожен вплив (зображений дугою в графі) може бути як позитивним, так і негативним для досягнення тієї чи іншої цілі. Ступінь впливу

однієї цілі на досягнення іншої виражається відповідним показником — частковим коефіцієнтом впливу (ЧКВ). У МЦДОА враховується зміна ЧКВ із плином часу, тому ЧКВ  $w_{ij}$   $i$ -ї цілі на  $j$ -ту в момент часу  $t$  визначається виразом

$$w_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau_{ij}, \\ w_{ij}, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases} \quad (1)$$

де  $\tau_{ij}$  — експертна оцінка затримки впливу  $i$ -ї цілі на  $j$ -ту. Для таких цілей як проекти (варіанти рішень) затримка їхнього впливу на ту чи іншу ціль, зазвичай, збільшується на визначену експертним шляхом величину тривалості виконання проекту.

### Формування підмножин сумісних цілей

МЦДОА передбачає визначення ЧКВ експертним шляхом. Для підвищення достовірності таких експертних оцінок, як правило, застосовують метод парного порівняння. Стосовно порівняння ступенів впливів множини цілей на деяку визначену ціль слід зазначити, що в рамках моделі, що описується, розрізняють сумісні та несумісні цілі, які спільно впливають на деяку визначену ціль. Сумісними вважаються цілі, досягнення однієї з яких не виключає необхідності та можливості досягнення іншої, і несумісними в протилежному випадку.

Оскільки будь-які порівняльні оцінки є сенс застосовувати тільки серед множин сумісних між собою об'єктів, то існує необхідність у знаходженні таких підмножин об'єктів максимальної потужності, кожна з яких включала б тільки сумісні між собою об'єкти. В [4] запропоновано метод визначення підмножин сумісних об'єктів, який є ітераційним і передбачає визначення сумісних підмножин у процесі поступового отримання інформації про несумісність пар об'єктів із вихідної множини об'єктів. Метод характеризується значно меншою трудомісткістю порівняно з методом, описаним у [1], де вирішення задачі пов'язувалось із пошуком множини простих шляхів максимальної довжини у графі сумісності. Задача формулюється у такий спосіб.

Дано: множину об'єктів  $A = \{a_i\}$ ,  $i \in I$ , де  $I = \{1, 2, \dots, n\}$  — множина індексів;  $P$  — множина пар сумісних об'єктів, тобто пар  $\langle a_i, a_j \rangle$  [ $a_i, a_j \in A$ ], для яких  $a_i * a_j = \langle \text{«істина»} \rangle$  («\*» — уведена бінарна операція сумісності).

Знайти:  $A_s \subseteq A$  ( $s \in I$ ), такі, що  $\forall m[(a_m \in A_s) \wedge (\bigstar_{m \in I} a_m = \langle \text{«істина»} \rangle)] \wedge \forall k[(a_k \notin$

$$\notin A_s) \wedge (a_k \in A)] \text{ справедлива рівність: } a_k * \left( \bigstar_{\substack{a_m \in A_s \\ m \in I}} a_m \right) = \langle \text{«хиба»} \rangle.$$

Запропонований метод знаходження підмножин  $A_s$  у множині  $A$  припускає визначення цих підмножин у процесі послідовного виключення елементів з множини пар несумісних об'єктів. Метод є ітераційним, і кількість ітерацій дорівнює кількості елементів у вищезгаданій множині пар. Перед початком виконання алгоритму вважаємо, що всі пари об'єктів — сумісні, при цьому, природно, множина сумісних об'єктів збігається з вихідною множиною ( $A_s = A$ ). Нехай у результаті

деякого експерименту встановлена несумісність пари  $\langle a_k; a_l \rangle$ , тобто ця пара виключається з множини сумісних пар.

Доведено [4], що для множини  $A$  сумісних об'єктів потужності  $n$  при виключенні пари  $\langle a_k; a_l \rangle$  з множини сумісних пар отримуємо дві підмножини сумісних об'єктів:  $A_1 = \{a_i | i \in I, i \neq k\}$ , і  $A_2 = \{a_i | i \in I, i \neq l\}$  потужності  $(n - 1)$  кожна, і що ця потужність є максимально можливою. У такий спосіб виконується кожна ітерація запропонованого методу над усіма підмножинами, що отримані на попередньому кроці. Крім того, з метою мінімізації кількості отриманих підмножин сумісних об'єктів, на кожній ітерації алгоритму виконуються всі можливі поглинання отриманими множинами тих множин, що є підмножинами перших. Ітеративний процес припиняється, коли у множині пар несумісних об'єктів не залишиться елементів.

Окрім меншої трудомісткості, запропонований метод надає можливість визначати (виділяти) сумісні підгрупи цілей у ході надання інформації про попарну сумісність цих цілей. Корисною властивістю методу є можливість повторного визначення сумісних підгруп цілей після редагування інформації про сумісність пар цілей, при додаванні або видаленні деякої цілі з ієрархії. Особливо корисним для МЦДОА при експертній побудові ієрархії цілей є те, що повторне визначення сумісних підгруп цілей відбувається без повторного використання або введення інформації про сумісність пар, яка залишалась незмінною.

## Визначення часткових коефіцієнтів впливу

Як зазначалось вище, визначення ЧКВ, позначених у (1) через  $w_{ij}$ ,  $j \in N$  — коефіцієнти впливу цілей  $j$  на деяку ціль  $i$  в ієрархії, відбувається в рамках уже визначених сумісних підгруп. Такі ЧКВ є нормованими величинами, і для кожної  $k$ -ї групи сумісних цілей задовольняють умову

$$\sum_{j=1}^K |w_{ij}^{(k)}| = 1, \quad (2)$$

де  $w_{ij}^{(k)}$  — ЧКВ  $j$ -ї цілі на  $i$ -у ціль в  $k$ -й групі сумісних цілей;  $K$  — кількість сумісних цілей у  $k$ -й групі.

Оскільки цілі можуть мати як позитивний, так і негативний вплив, що відображується знаком відповідного ЧКВ, то перед виконанням порівнянь впливів, цілі, які мають негативний вплив, замінюються на протилежні за значенням (тобто, на їхні логічні заперечення). Як наслідок, при визначенні ЧКВ, усі цілі  $j$  в  $k$ -й підгрупі сумісних цілей мають позитивний вплив на досягнення  $i$ -ї цілі.

Для визначення ЧКВ пропонується використовувати методи групових парних порівнянь, які достатньою мірою задовольняють вимоги щодо достовірності отриманих результатів. У зв'язку з розробкою методів експертного оцінювання, що порівняно з існуючими методами, дозволяють більш повно та без тиску на експертів отримувати від них оцінки, для визначення ЧКВ доцільно використання методу парних порівнянь зі зворотним зв'язком, що надає експертові можливість проводити оцінювання в шкалі, докладність якої адекватно відображає його інформо-

ваність (компетентність) у питанні експертизи [5]. Доцільність використання даної технології експертного оцінювання, зокрема для визначення ЧКВ цілей ієрархії, підтверджено проведеним порівняльним експериментальним дослідженням [6].

### Ступені досягнення цілей

В основу МЦДОА покладено узагальнену процедуру визначення ступеня досягнення довільної цілі ієрархії в деякий заданий момент часу  $t$ . Оскільки, як зазначено в [1], при визначенні ступеня досягнення деякої цілі необхідно аналізувати ступені досягнення цілей, що мають безпосередній вплив на дану ціль для кожної альтернативної підмножини сумісних між собою цілей, то  $d_i(t)$  — ступінь досягнення  $i$ -ї цілі в момент часу  $t$  визначається виразом

$$d_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } D_i(t) < T_i, \\ T_i, & \text{якщо } D_i(t) = T_i, \\ f(D_i(t)), & \text{якщо } T_i < D_i(t) < 1 - \sum_j |w_{ij}^{(k-)}|, \\ 1, & \text{якщо } 1 - \sum_j |w_{ij}^{(k-)}| \leq D_i(t) \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $D_i(t) = \sup_k \sum_j w_{ij}^{(k)} d_j(t)$ ;  $T_i$  — поріг досягнення  $i$ -ї цілі;  $f(D_i(t))$  — функція ступеня досягнення  $i$ -ї цілі в момент часу  $t$ ;  $w_{ij}^{(k-)}$  — ЧКВ  $j$ -ї цілі в  $k$ -й групі сумісних цілей, який має негативний вплив на  $i$ -ту ціль.

### Розрахунок рейтингу

Сутність розрахунку за допомогою МЦДОА рейтингу (відносної оцінки) варіанта рішення, що відповідає  $l$ -й цілі ієрархії в деякий момент часу  $t$  зводиться до визначення різниці між ступенями досягнення головної цілі —  $d_0(t)$  за умови повного досягнення всіх цілей, що відповідають визначеним для порівняння варіантам рішень —  $d_i(t) = 1, i \in L, L = \{m..n\}$  та за умови  $d_i(t) = 1, i \in L \setminus \{l\}, d_l(t) = 0$ . Тобто рейтинг тієї чи іншої альтернативи (варіанта рішення) це — різниця між ступенем досягненням головної цілі за наявності впливу цієї альтернативи на головну ціль і без такого.

Задля розширення можливостей застосування МЦДОА пропонується удосконалення методу з наданням можливості обчислювати рейтинг альтернатив не лише відносно досягнення головної цілі ієрархії, а й щодо будь-якої обраної цілі. Це дозволяє порівнювати вплив альтернативних варіантів рішень на проміжні цілі в загальній моделі предметної області. На рис. 1 зображено екранну форму СППР «Солон-3», де реалізовано режим вибору цілі, відносно якої проводяться обчислення.

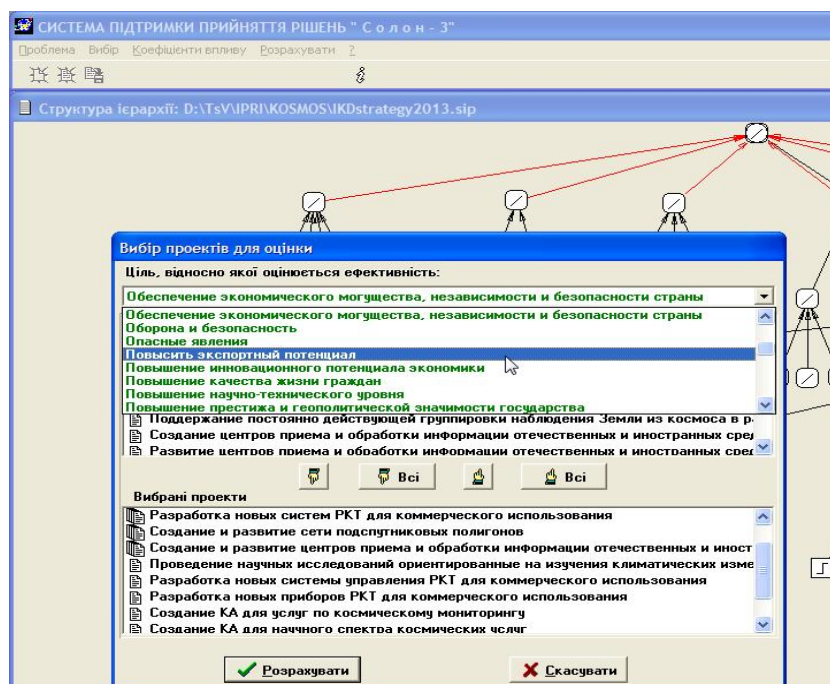


Рис. 1. Екранна форма СПДР «Солон-3» (вибір цілі, відносно якої проводиться оцінювання)

Процес обчислення  $d_i(t)$  — ступеня досягнення обраної  $i$ -ї цілі на момент часу  $t$  можна описати наступним чином. У графі ієрархії цілей проводиться пошук цілей, що не впливають на інші цілі даної ієрархії, тобто, виділяється множина вершин, в які не входить жодна дуга графа. З цієї множини цілей (вони, зазвичай, є альтернативами/проектами) починається розрахунок ступенів досягнення цілей. Первісні значення ступенів досягнення цілей з цієї множини призначаються, як щойно зазначалось, рівними 1 або 0, хоча можливі і проміжні значення, у випадку, якщо потрібно врахувати неповне виконання проекту на заданий момент часу (див. екранну форму на рис. 2). Враховувати експертну оцінку ступенів виконання проектів доцільно при аналізі проміжних станів моделі та в разі часткового фінансування проектів.

Слід зазначити, що в загальному вигляді, у графі може не виявитися вершин, у які не входить жодна дуга. Хоча, за логікою побудови графа, це малоімовірно, і в [1] такий сценарій не розглядався, слушно зазначити, що доцільно при побудові ієрархії включати ціль «Інші фактори», яка впливає на усі ті цілі ієрархії, досягнення яких недостатньою мірою обумовлюється множиною наявних в ієрархії цілей. У випадку дотримання такої рекомендації, початкова множина цілей при визначенні ступенів досягнення цілей не буде порожньою, бо до неї буде віднесено ціль «Інші фактори», на яку немає інших впливів.

У подальшому формується множина цілей, що можуть бути досягнуті безпосередньо із цілей, які належать множині, сформованій на попередньому кроці. Формування проводиться шляхом включення усіх цілей (вершин графа), на які мають безпосередній вплив цілі з попередньої множини (у які входять дуги, що

виходять із відповідних вершин). У цю множину можуть потрапити і цілі, що належать попередній множині.

Назва проєкту	% виконання
"Варіант"	100
"Біосорбент"	100
"Біолабораторія"	52
"Сигнал-ТБ"	50
"Безпека"	60
"Навігація"	25
"Освіта-КА"	90
"Освіта"	10
"Адаптація"	100
Проекти "Міжвідомчої програми"	100
"Співробітництво"	100
"Морський старт"	20
"Наземний старт"	100

Рис. 2. Екранна форма для введення експертної оцінки ступенів виконання проєктів

Для кожної цілі зі сформованої множини проводиться визначення ступеня її досягнення на момент часу  $t$ . Фактично, у ході визначення ступенів досягнення цілей відбувається просування по графу ієрархії від цілей нижнього рівня до цілей верхніх рівнів і, врешті, до головної цілі проблеми. У випадку наявності у графі зворотних зв'язків (дуг, що виходять з вершин вищих рівнів і входять у вершини нижчих рівнів), ітераційний процес визначення ступенів досягнення цілей припиняється у випадку, коли модуль різниці між обчисленими значеннями ступеня досягнення обраної цілі на сусідніх ітераціях ( $x$ ) та  $(x + 1)$  не буде перевищувати заданої точності  $\varepsilon$ :

$$|d_i(t)^{(x)} - d_i(t)^{(x+1)}| \leq \varepsilon. \quad (4)$$

### Вхідні параметри та реперні точки

Рис. 3. Екранна форма для введення вхідних параметрів розрахунку

Точність розрахунків  $\varepsilon$ , рівно як і період планування вводяться як вхідні параметри (форму введення цих параметрів у СППР «Солон-3» зображено на рис. 3).

Виходячи зі специфіки задач, що вирішуються за допомогою цієї СППР, мінімальною одиницею вимірювання часових проміжків є день (доба), тобто планування проводиться з точністю до одного дня. За замовчуванням, у формі пропонується рекомендований період планування — період часу, на якому розраховуються відносні рейтинги вибраних проєктів. Ця величина (у днях) розраховується за графом ієрархії цілей шляхом просування від вершин ниж-

нього рівня до верхнього, аналогічно процесу визначення ступенів досягнення цілей, але у ході цього процесу сумуванням затримок розповсюдження впливів формується величина максимальної тривалості часового періоду, поза яким зміни у результатах розрахунку відносних рейтингів проектів вже не відбуваються.

МЦДОА дозволяє розрахувати відносні рейтинги проектів на будь-який момент часу від початку їхньої реалізації, але оскільки обчислені значення рейтингів змінюються лише в т.зв. реперних точках часової осі, то ці точки пропонується визначити заздалегідь і лише одноразово, а не визначати перед кожною ітерацією. На відміну від запропонованого в [1] ітераційного способу, визначення наступного  $t^{(i+1)}$  моменту часу для виконання обчислення ступенів досягнення цілей матиме вигляд

$$t^{(i+1)} = \inf_{k, \tau_k \geq t^{(i)}} (\tau_k), k \in \{1, 2, \dots, n-1\}, \quad (5)$$

де  $\tau_k$  — значення затримок впливів цілей в ієрархії, що містить у собі  $n$  цілей, наразі пропонується провести прохід від цілей нижнього рівня до верхнього з обчисленням і долученням до списку всіх можливих затримок впливів цілей в ієрархії. Прохід організується одночасно з процесом визначення ступеня досягнення головної цілі ієрархії, і за наявності зворотних зв'язків продовжується аж до виконання умови (4). Фактично, формування списку затримок впливів цілей виконується разом із розрахунком вищезгаданого рекомендованого періоду планування, значення якого відповідає максимальній величині серед обчислених затримок впливів. На рис. 4 показано розкритий список затримок впливів (у днях), що відповідають точкам часової осі (реперним точкам), для яких проводяться розрахунки рейтингів альтернатив.

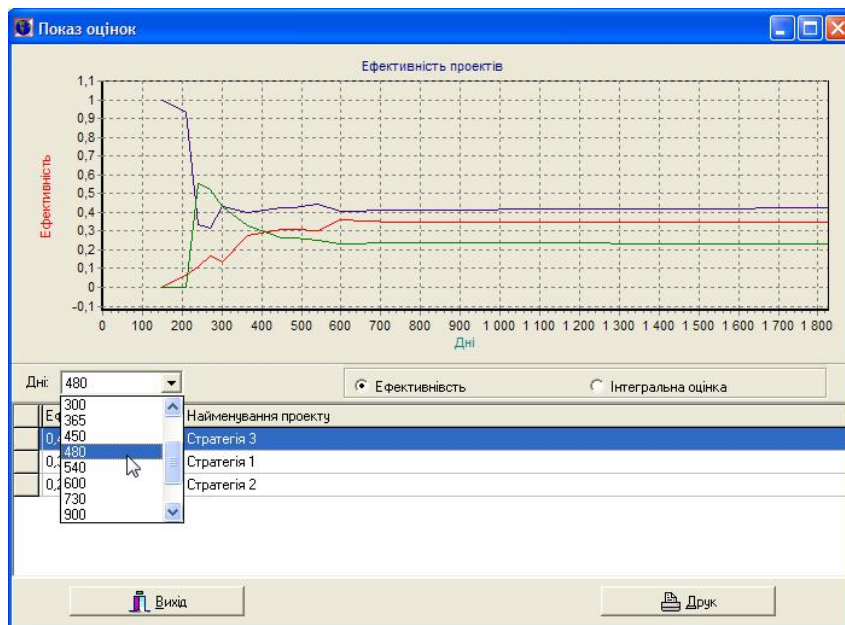


Рис. 4. Екранна форма відображення результатів розрахунку



## Інтегральний показник

Окрім розрахованих рейтингів альтернатив у реперних точках, для аналізу динаміки змін у співвідношеннях між цими оцінками корисним є додатково розроблений режим перегляду т.зв. інтегральної оцінки (рис. 5). У даному режимі на графіках відображується інтегральний показник ефективності проектів  $i(t)$

$$i(t) = \int_0^t r(t) dt, \quad (6)$$

який за своєю суттю є інтегралом за часом  $t$  від функції рейтингу (відносної оцінки) проекту  $r(t)$ , вигляд якої можна бачити на рис. 4.

У режимі перегляду інтегральної оцінки (рис. 5) точки перетину графіків відображують моменти часу з початку виконання проектів, коли змінюється співвідношення між проектами у сенсі переважного їхнього домінування порівняно з іншими. Так, з екранної форми можна бачити, що два нижніх графіки перетинаються приблизно на відмітці 850 днів (2 роки і 4 місяці) і, зважаючи на це, можна зробити висновок, що у визначеній строковій перспективі слід віддати перевагу проекту, чий графік виявився вищим.

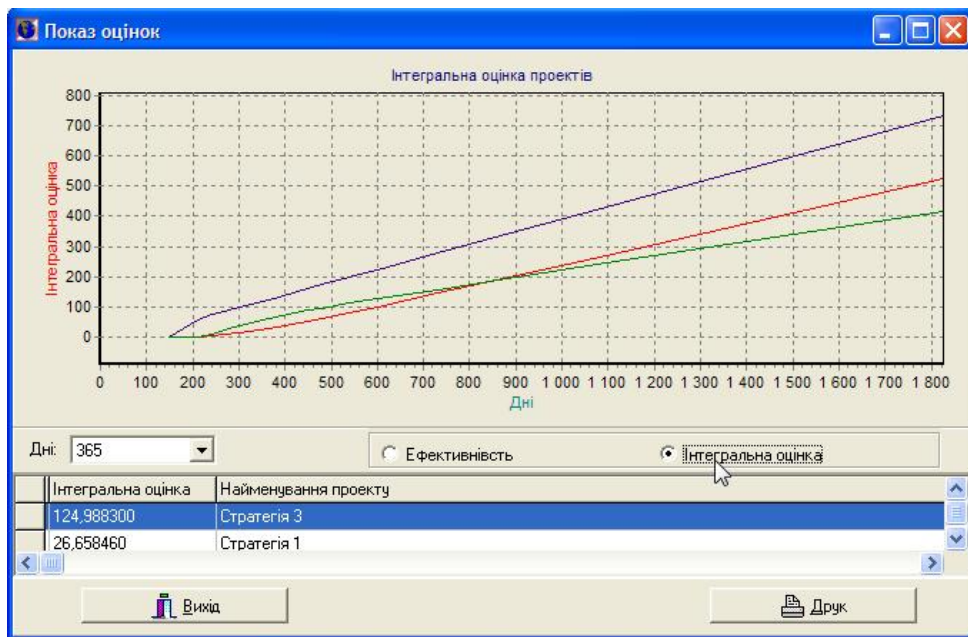


Рис. 5. Екранна форма відображення інтегральної оцінки проектів на проміжку часу

## Висновки

Задля підвищення ефективності та функціональності методу цільового динамічного оцінювання альтернатив запропоновані наступні удосконалення, які дозволяють більш широко практично застосовувати метод у сучасних системах підтримки прийняття рішень:

— визначення груп сумісності цілей за більш ефективним алгоритмом, що дозволило визначати сумісні групи у процесі побудови ієрархії цілей та оперативно редагувати інформацію щодо сумісності пар альтернатив;

— визначення (обчислення) доцільного інтервалу планування для кожної сформованої бази знань. У ході цього процесу запропоновано формувати множини реперних точок часової шкали для подальшого обчислення рейтингів проектів у цих часових точках;

— можливість динамічного оцінювання альтернатив стосовно будь-якої (не лише головної) цілі ієрархії, що дозволяє проводити аналіз впливу варіантів рішень на проміжні цілі в загальній моделі предметної області;

— урахування часткового (неповного) виконання проектів на деякий момент часу шляхом надання експертної оцінки ступенів виконання проектів, що є корисним при аналізі проміжних станів моделі предметної області та у разі моделювання часткового фінансування проектів;

— визначення інтегрального показника відносної ефективності проектів, який дає змогу аналізувати зміни у співвідношеннях між проектами у сенсі переважного їхнього домінування над іншими проектами на проміжках часу.

1. Тоценко В.Г. Об одном подходе к поддержке принятия решений при планировании исследований и развития. Ч. 2. Метод целевого динамического оценивания альтернатив / В.Г. Тоценко // Проблемы управления и информатики. — 2001. — № 2. — С. 127–139.

2. Figueira J. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys / J. Figueira, G. Salvatore & M. Ehrgott (Eds.). — New York: Springer. — 2005. — 1048 p.

3. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. — М.: Радио и связь, 1992. — 504 с.

4. Циганок В.В. Про один метод виділення в множині об'єктів підмножин взаємно сумісних об'єктів / В.В. Циганок // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 1999. — Т. 1, № 2. — С. 78–81.

5. Циганок В.В. Агрегація групових експертних оцінок, що отримані у різних шкалах / В.В. Циганок // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2011. — Т. 13, № 4. — С. 74–83.

6. Експериментальний аналіз технології експертного оцінювання / В.В. Циганок, П.Т. Качанов, С.В. Каденко [та ін.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2012. — Т. 14, № 1. — С. 91–100.

Надійшла до редакції 06.03.2013