

## УДК 519.711.2

О. М. ПШІНЬКО<sup>1</sup>, В. В. СКАЛОЗУБ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Будівлі та будівельні матеріали», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта pshinko@r.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup> Факультет «Технічна кібернетика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (056) 373-15-35, ел. пошта skalozub\_vl\_v@mail.ru

## НЕЧІТКІ ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КЛАСІВ ВИРОБНИЧО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**Мета.** Стаття присвячена питанням удосконалення економіко-математичних моделей оптимального планування розподілу замовлень на обслуговування, які відповідають процесам експлуатації класів технічних систем з урахуванням умов невизначеності. При плануванні ураховується спеціалізація виконавців робіт, а також можливості виникнення збурень параметрів виробничих потужностей та зовнішнього середовища, які представлені нечіткими величинами. **Методика.** Для планування процесів експлуатації декількох класів подібних об'єктів (виробничо-технічних систем, ВТС), з урахуванням вимог щодо розподілу робіт на основі спеціалізації виконавців, сформовано економіко-математичні моделі, які узагальнюють відкриту модель транспортної задачі про цілерозподілення з обмеженими пропускними здатностями. При цьому моделі відповідають умовам функціонування багатопродуктових потоків. В них коефіцієнти матриці питомих вартостей та обмеження параметрів ресурсів окремих спеціалізованих виконавців являються нечіткими величинами. **Результати.** Удосконалено економіко-математичні моделі із аналізу та планування процесів експлуатації декількох класів виробничо-технічних систем, які забезпечують можливості нечіткого опису параметрів та умов. Моделі ураховують як поточний стан технічних систем, так і можливі збої процесів експлуатації. **Наукова новизна.** Отримано розвиток економіко-математичних моделей планування процесів експлуатації неоднорідних класів технічних систем, які ураховують вимоги щодо спеціалізації виконавців, а також можливості нечіткого опису параметрів системи. **Практична значимість.** Результати досліджень забезпечують можливості підвищення ефективності процесів експлуатації класів неоднорідних технічних систем, автоматизованого планування розподілу ресурсів між виконавцями з урахуванням спеціалізації, нечіткості параметрів і збурень зовнішнього середовища.

*Ключові слова:* економіко-математичне моделювання, класи технічних систем, процеси експлуатації, спеціалізація, нечітке математичне програмування та управління, двох етапні моделі планування.

### Вступ

У статті досліджуються питання підвищення ефективності процесів експлуатації парків техніко-технологічних систем, в першу чергу залізничного транспорту, за рахунок формування удосконалених економіко-математичних моделей аналізу параметрів стану та планування розподілу замовлень на обслуговування між виконавцями. При цьому головна увага приділяється наступним суттєвим обставинам, які відрізняють пропоновані моделі планування від загально відомих. По-перше, в якості об'єкту дослідження обрано декілька класів виробничо-технічних систем (ВТС), окремих парків, які обслуговуються одними і тими ж підрозділами,

«виконавцями». По-друге, при плануванні розподілу замовлень на обслуговування ураховуються вимоги спеціалізації, через різну ефективність процесів обслуговування (огляд, ремонт, діагностування ін.) різними виконавцями. По-третє, ураховуються фактори невизначеності (параметрів ВТС та їх підсистем, зовнішніх впливів, потреб тощо), які існують при плануванні. Тож у роботі ураховуються умови нечіткості вихідних даних.

Зазначимо, що певним чином, для парку електричних двигунів (ЕД) залізничних стрілочних переводів, такі питання розглянуто в роботі [1]. При цьому ураховується необхідність забезпечення технологічної та економічної ефективності процесів експлуатації ВТС, а та-

© О. М. Пшінько, В. В. Скалозуб 2016

кож що вирішення цих завдань має численні складові, обумовлені рівнем розгляду, об'єктами і предметами аналізу, засобами реалізації. Питання планування та управління процесами експлуатації класів об'єктів узагальнюють завдання автоматизованої експлуатації окремого «парку» ЕД, представлені у роботах [1 – 3]. Результати цієї роботи можуть бути застосовані у якості складових інтелектуальної автоматизованої системи планування процесів експлуатації ВТС.

### Постановка задач дослідження

У роботі сформовано економіко-математичні моделі оптимального планування для процесів розподілу замовлень на обслуговування між спеціалізованими «виконавцями», як складової комплексу завдань експлуатації декількох класів ВТС. В них ураховано умови нечіткої невизначеності [1, 4, 5], що в значній мірі відповідає даним, які виникають на практиці. Спеціалізація виконавчих систем при розподілу робіт за умов нечіткої інформації також є новим і важливим аспектом планування процесів експлуатації кількох класів ВТС.

Завдання управління класом «парків» ВТС полягає в наступному. Розглядається кілька класів об'єктів, ВТС, однакового (або подібного) призначення, а також процеси їх експлуатації. Технічний стан об'єктів ВТС на даному етапі експлуатації визначається нормативно або автоматизовано, за рахунок цього утворюються множини замовлень на обслуговування. Також відомі ресурси (технічні, матеріальні, трудові та ін.), необхідні або ж виділені для експлуатації різних типів парків об'єктів. Вважається відомою ефективність роботи кожного із виробничих підрозділів при виконанні кожного виду замовлень щодо процедур експлуатації, які представлені матрицями з нечіткими коефіцієнтами.

Необхідно розподілити роботи із обслуговування об'єктів різних класів між підрозділами-виконавцями. При плануванні ураховується спеціалізація виконавців робіт, а також можливість виникнення збурень параметрів виробничих потужностей та зовнішнього середовища,

які можна представити нечіткими величинами. Для оптимального планування необхідно сформулювати економіко-математичні моделі, які узагальнюють відкриту модель транспортної задачі про розподілення цілей [6, 7] з обмеженими пропускними здатностями. Крім того моделі повинні відповідати умовам функціонування багатопродуктових потоків, в яких коефіцієнти матриці питомих вартостей та обмеження параметрів ресурсів окремих спеціалізованих ВТС являються нечіткими величинами.

### Модель нечіткого математичного програмування для планування експлуатації класів ВТС з урахуванням спеціалізації виконавців

Для планування процесів експлуатації (виконання ремонтів, діагностування, технічного обслуговування та ін.) декількох парків, класів подібних об'єктів, з урахуванням вимог щодо розподілу робіт на основі спеціалізації виконавців, сформуємо економіко-математичну модель що узагальнює результати роботи [1]. А саме, виконаємо модифікацію відкритої моделі транспортної задачі (ТЗ) про «цілерозподілення» [7] з обмеженими пропускними здатностями, яка має відповідати умовам функціонування багатопродуктових потоків [6] ( $k$ ), ( $k = \overline{1, p}$ ). Тож якщо в [1] для планування розподілу робіт між виконавцями використана лише одно продуктова модель ТЗ, в якій коефіцієнти матриці питомих вартостей заздалегідь не можуть бути точно обчислені, а лише представлені певними нечіткими величинами, то узагальнена модель ТЗ призначена для аналізу та планування багатопродуктових потоків замовлень на обслуговування при обмежених ресурсах окремих спеціалізованих виконавців, систем типу «j».

Економіко-математична модель планування зазначених видів робіт, яка ураховує наявність декількох класів об'єктів, представлена у формі нечіткого математичного програмування (НМП) [1, 4, 5], має наступний вигляд:

$$R(X) = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{C}_{ij}^{(k)} X_{ij}^{(k)} \rightarrow \max_{\{X_{ij}^{(k)}\}} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij}^{(k)} \leq N_j^{(k)}, (j = \overline{1, n}) \quad \sum_{j=1}^n X_{ij}^{(k)} \leq \tilde{d}_i^{(k)}(t), (i = \overline{1, m}) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^p N_j^{(k)} \leq N_j, (j = \overline{1, n}), \quad (3)$$

$$X_{ij}^{(k)} \leq \tilde{d}_{ij}^{(k)}, (i = \overline{1, m}); \quad X_{ij}^{(k)} \geq 0, (i = \overline{1, m});, (j = \overline{1, n}), (k = \overline{1, p}) \quad (4)$$

В (1) - (4) позначено:  $X_{ij}^{(k)}$  - число заявок типу «і», які обслуговує спеціалізована система типу «j», при цьому вони стосуються експлуатації елементів класу  $(k)$ ,  $(k = \overline{1, p})$ ;  $\tilde{C}_{ij}^{(k)}$  - матриця нечітких оцінок питомої ефективності обслуговування для елементів із класу  $(k)$ , що відповідає змінним  $X_{ij}^{(k)}$ ;  $\tilde{d}_{ij}^{(k)}$  - нечітке число замовлень типу «і» що призначаються для обслуговування спеціалізованою системою «j» у період «t». Укажемо, що обмеження (3) характеризують можливості спеціалізованих підрозділів щодо обслуговування замовлень  $X_{ij}^{(k)}$ . В них  $N_j$  визначають граничні можливості спеціалізованих систем типу «j» обслуговування всіх класів  $(k)$ . Умови (3) відіграють роль додаткових обмежень багатопродуктових потоків у мережах [6], як характеристики інтегрованих можливостей обслуговування неоднорідних потоків системою «j». Формування моделі (1) - (4) головним чином полягає у визначення системи нечітких матриць оцінок питомої ефективності обслуговування  $\{\tilde{C}_{ij}^{(k)}\}$ .

У зв'язку із нечіткими параметрами наведеної моделі планування для її реалізації необхідно застосовувати відповідні обчислювальні процедури [4]. Так у моделі (1) - (4) застосована бінарна операція «+» із знаходження максимуму на заданій нечіткій області, що позначає операцію додавання нечітких множин та ін. [5]. Розв'язання зазначеної задачі може бути зведено до вирішення встановленої сукупності завдань лінійного програмування, формування яких виконується шляхом уведення системи дискретних  $\alpha$ -рівнів для нечітких величин [4, 5].

При цьому нечіткі обмеження (2) - (4) приймають інтервальный вигляд. Далі для приведення моделі (1) - (4) до виду звичайної задачі лінійного програмування (ЛП) буде необхідним записати нерівності окремо по лівій і правій границях інтервалів, з урахуванням знаків нерівності [4]. При цьому кількість обмежень лінійної оптимізаційної задачі збільшується в два рази. Разом з тим отримані завдання ЛП можна вирішити стандартним симплексним методом [7].

Для остаточного вирішення завдання планування при нечітких даних задають певну множину значень рівнів  $\alpha$ , формують для них моделі ЛП, систематично розв'язавши їх отримують функцію приналежності нечіткого рішення задачі (1) - (4). Далі методами нечіткого управління на основі сформованого нечіткого представлення моделей планування розраховується детерміноване рішення (1) - (4). Реалізація цієї процедури для умовної моделі наведена нижче.

### Моделі планування робіт при експлуатації класів ВТС на основі двох етапних методів нечіткого управління

При технолого-економічному управлінні процесами експлуатації декількох класів об'єктів на практиці необхідно урахувати різні типи умов невизначеності (значень параметрів технічних систем, станів середовища ін.). З метою урахування у планах розподілу ресурсів таких невизначеностей у [1] було виконано формалізацію завдання із планування на основі нечіткої двохетапної моделі оптимального планування (НДМОП). А саме – попередньо була визначена апріорна інформація за можливими шаблонами планування –  $Sh_k(V_k, H_k, \mu_k)$ . Шаплони являлися альтернативними варіантами сценаріїв відмов  $V_k$  у ви-

гляді різних можливих збурень умов – «збоїв». «Збої» (можливі відхилення процесів експлуатації ін.) описувалися відповідними значеннями параметрів умов нечіткості  $\mu$ , а також оцінювалися додатковими витратами на компенсацію збурень (як детермінованих  $H_k(X(X_{kj}))$  або нечітких  $\tilde{H}_k(X(X_{kj}))$  функції). Для визначених шаблонів реалізації задавалися нечіткі показники можливостей їх виникнення  $\mu_k$ . Далі, вважалися відомими функції (детерміновані  $F(X)$  або нечіткі  $\tilde{F}(X)$ ) із оцінки економічної ефективності планів  $X(Sh_k(V_k, H_k, \mu_k))$  обслуговування –  $\tilde{F}(X)$ . Необхідно було визначити оптимальний вектор  $X^*(X_{kj^*})$  послідовностей

обслуговування об'єктів парку (класу однорідних систем) шляхом застосування НДМОП.

При плануванні експлуатації кількох класів об'єктів також представимо планування  $X^*(X_{kj^*})$  як пошук і вибір  $X_{kj^*}$  з урахуванням вектора нечітких факторів  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)$ . Вони характеризують реалізації недетермінованих станів системи експлуатації, що відповідають шаблонам  $Sh_k(V_k, H_k, \mu_k)$ , для яких відомі нечіткі величини  $\{\mu(\mu_i)\}_s$ .

Постановка двохетапної нечіткої задачі планування процесів експлуатації для класу ВТС полягає в наступному. Для формалізації завдання введемо моделі «збурень» умов планування, і будемо розглядати параметри в обмеженнях (3) нечіткими дискретними величинами:  $\tilde{N}_j$  [4, 5]. Тобто:

$$\tilde{N}_j^{(k)} = \left\{ \frac{\mu_j^{(k)}}{N_j^{(k)}} \right\}_{Q_j}. \quad (5)$$

Змістовно ці «збурення» відповідають змінам виробничих потужностей ВТС у деякі періоди функціонування, відхиленням від запланованих або раціональних, які визначилися при аналізі моделі (1) – (4). Можна вважати що відхилення можуть мати різні знаки. У залежності від знаку відхилень ВТС несуть різні додаткові питомі витрати. За допомогою представлення обмежень (3) нечіткими величинами у модель задачі вводиться нечітка інформація про можливості реалізації різних значень  $\tilde{N}_j$ . Указані обставини дають можливість представлення процесу планування за допомогою двохетапної схеми (6) – (7) [7]. А саме, при

формуванні плану ураховуються можливі збурення умов, які ураховуються у відповідності до міри можливості таких подій. У подальшому будемо реалізувати цю форму моделі планування розподілу неоднорідних замовлень, робіт, між спеціалізованими виконавцями, що встановлюють матриці  $\tilde{C}_{ij}^{(K)}$ .

Також будемо вважати стани  $\mu_i$  як детерміновані  $[d_i^1, d_i^2]$  або нечіткі  $[\hat{d}_i^1, \hat{d}_i^2]$  діапазони, що характеризують значення можливих відхилень або поточних значень виробничих потужностей

$$\mu_i = \langle [\mu_i^1, \mu_i^2], h_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle; \quad \mu_i = \langle [\hat{\mu}_i^1, \hat{\mu}_i^2], \hat{h}_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle, \quad (6)$$

де  $h_i(\mu_i)$ ,  $\hat{h}_i(\mu_i)$  – питомі оцінки (детерміновані або нечіткі) додаткових витрат на корегування плану розподілу в умовах  $\mu_i$ .

Представимо НДМОП планування векторів  $X(X_{kj})$  у вигляді:

$$\{\Phi(X) = \tilde{R}(X) + FC[\{\hat{f}_j^{(k)}(X, Y(X, \mu), \mu)\}_{P \times Q_j}]\} \Rightarrow \max_{X \in G_X} \quad (7)$$

В (7) позначено: нечітка функція  $\tilde{R}(X)$  – вартісна оцінка вектора показників керування  $X_{kj}$  при виконанні умов планування,  $\hat{f}_j^{(k)}(*)$  –

функція додаткових витрат на коректування плану за умов реалізації збурень із ступенем належності  $\mu$ ,  $Y(X^{(t)}, \mu)$ ,  $FC[*]$  – знак операції нечіткого висновку відповідно величин

$\hat{f}_h(*)$ ,  $G_X$  – область допустимих значень параметрів планів на етапі планування (t),  $X^{(t)}$ . При реалізації (7) методами нечіткого висновку [4, 6] для деякого  $X' \in G_X$  розраховують та узагальнюють по  $\mu(\mu_i)$  значення  $\hat{f}_h(X', Y', \mu_i)$ , які разом із  $\tilde{R}(X')$  дають оцінку  $X': \Phi(X')$ , яка вимірює якість  $X' \in G_X$  відповідно (7). За (7) оптимальний вектор  $X(X_{kj*})$  забезпечує мінімум суми витрат на обслуговування парку ВТС при плану розподілу і очікуваних додаткових витрат за умов виникнення відмов вигляду (6) процесу експлуатації парків.

Зазначимо що сформовані моделі планування відносяться до категорії нечіткого математичного планування. При цьому детерміновані аналоги (1) – (4) являються лінійними [6]. Реалізація моделей нечіткого математичного програмування виконується шляхом представлення нечітких величин (НВ) сукупністю детермінованих моделей (в нашому випадку – лінійного програмування) для  $\alpha$  – рівнів [4, 5]. Змістовно реалізація двохетапної моделі (7) визначається функціями додаткових витрат  $\hat{f}_j^{(k)}(*)$  при виникненні умов зміни параметрів системи, що характеризується деякою нечіткою величиною зі ступенем належності  $\mu$ . Визначення таких функцій на практиці являється досить складним завданням, яке не має загальноприйнятого вирішення. Разом з тим існує досить значне число методів нечіткого управління, які передбачають представлення нечітких моделей системами правил, які обробляються процедурами Мамдані, Ларсена, Такагі – Сугено ін. [5]. Розглянемо реалізацію завдань виду (1) – (4) (в яких параметри обмежень (3)  $N_j$ , що визна-

чають граничні можливості спеціалізованих систем типу «j» щодо обслуговування всіх класів ( $k$ ), являються нечіткими величинами:  $\tilde{N}_j$ ) як процедури методу типу Такагі – Сугено. В цьому методі ліві частини (передумови) правил, які утворюють модель системи, містять нечіткі величини, а праві – деякі функції  $Z_r(X_*)$  детермінованих вхідних змінних  $X_*$ . При аналізі поточної ситуації  $X_*$ , для якої розраховується керування, визначається ступінь «активності»  $\{W_r\}$  кожного із правил, як деякого чисельного коефіцієнту, а також  $\{Z_r(X_*)\}$ . Величина керування розраховується як зважене значення відповідно  $\{Z_r(X_*)\}$  та  $\{W_r\}$ .

Застосуємо загальну схему методу Такагі – Сугено для реалізації моделі (1) – (4), в якій параметри (3) являються дискретними нечіткими величинами виду (5). Відповідно (5) нечіткі обмеження (3) визначаються наборами  $Q_j$  пар, тобто із характеристиками «достовірності реалізації відповідних значень»  $\{W_r\}$ . Саме ці значення  $\mu_j^{(k)}$  характеризують додаткову невідповідність параметрів моделі планування.

Наступні етапи формування рішень «збуреної» моделі вигляду (1) – (4), а також за умов нечіткості (5), визначаються так. Для урахування складової  $FC[*]$  (7) замість невідомих  $\hat{f}_j^{(k)}(*)$  використовуємо модель (1) – (4) для всіх значень нечітких величин (7). Загальний ваговий коефіцієнт «активності», що відповідає  $\{W_r\}$ , визначається методом Ларсена, як добуток, або методом Мамдані, як мінімум:

$$(a) W_r = \prod_k \mu_j^{(k)}; \quad (b) W_r = \min_k \{\mu_j^{(k)}\}, \quad (8)$$

де номери завдань (1) – (4) з конкретними значеннями  $N_j^{(k)}$  позначені як  $\{r\}$ . Також при цьому розраховується загальна оцінка цільового показника (9)  $R_r(X_*)$ , який є реалізацією

одного розрахунку за умов «збурення», відповідно (7). Остаточне значення результату планування визначається за схемою Такагі – Сугено, а саме

$$R(X_*) = \sum_r R(X_{r*}) W_r / \sum_r W_r \quad (9)$$

Таким чином, запропонована двохетапна нечітка модель планування розподілу робіт з урахуванням спеціалізації виконавців реалізується за рахунок реалізації набору моделей лінійного програмування [4, 7], сформованих для різних  $\alpha$  – рівнів, з подальшим розрахунком детермінованого рішення (9). Розглянемо приклад застосування рівнянь моделей планування (7) – (9).

### Питання реалізації моделі планування з нечіткими параметрами цілі та обмежень

Для наочності застосування процедур (7) – (9) розглянемо умовний фрагмент моделі (1) – (4), в якому у цільовій функції нечітким являється лише один параметр  $\tilde{a}_2$ , а у обмеженні – права частина (3)  $\tilde{D}$ . А саме у моделі планування залишимо одне обмеження, яке відповідає (3), та два невідомі параметри  $\bar{X} = (x_1, x_2)$ . Тобто маємо таку умовну модель НМП максимізації:

$$F_G(X) = a_1x_1 + \tilde{a}_2x_2; \quad D_x : a_1x_1 + a_2x_2 \leq \tilde{D}; \quad (10)$$

де  $\tilde{a}_2$ ,  $\tilde{D}$  – деякі нечіткі величини. При цьому  $\tilde{D}$  змістовно відповідає значенню «приблизно 10», а  $\tilde{a}_2$  – «приблизно 3». Результати реалізації набору детермінованих моделей ЛП, які утворюються на основі (10) при уведенні для нечітких параметрів  $\alpha$  – рівнів, представлені у табл. 1. Відповідно процедури переходу до детермінованої моделі ЛП [4], значення нечітких величин на встановленому  $\alpha$  – рівні замінюється діапазоном  $[a_{2-\min}(\alpha); a_{2-\max}(\alpha)]$ ,

також формується діапазон для значення  $\tilde{D}$ :  $[D_1; D_2]$ . Також обмеження (10)  $D_x$  подвоюються (перше визначає умову не менше  $D_1$ , друге – не більше  $D_2$ ). В табл. 1 позначено встановлені  $\alpha$  – рівні для цільової функції  $\alpha_G$ , обмежень  $\alpha_D$ , моделі (10) у цілому  $\alpha_q$ , яке розраховано за методом Ларсена (8) – (а).

Таблиця 1

Реалізації детермінованих моделей ЛП при різних  $\alpha$  – рівнях НВ

$n_q$	$\alpha_q$	$\alpha_G$	$\tilde{a}_2$	$F_G(X_*)$	$x_1^*$	$x_2^*$	$\alpha_D$	$D_1$	$D_2$
1	1	1	3	16,667	3,333	3,333	1	10	10
2	0,9	1	3	18,0	3,0	4,0	0,9	9	11
3	0,8	1	3	19,333	2,667	4,667	0,8	8	12
4	0,7	1	3	20,667	2,333	5,333	0,7	7	13
5	0,9	0,9	3,2	17,333	3,333	3,333	1	10	10
6	0,9	0,9	2,7	15,667	3,333	3,333	1	10	10
7	0,81	0,9	3,2	18,8	3,0	4,0	0,9	9	11
8	0,81	0,9	2,7	16,8	3,0	4,0	0,9	9	11
9	0,64	0,8	2,7	17,93	2,667	4,667	0,8	8	12
10	0,64	0,8	3,2	21,733	2,333	5,33	0,8	8	13
11	0,42	0,7	3,2	23,2	2,0	6,0	0,6	7	14
12	0,36	0,6	2,7	26,0	1,667	6,667	0,6	6	15

У стовпцях  $\{D_1, D_2\}$  наведено значення обмеження  $\tilde{D}$ . Стовпці  $F_G(X_*)$ ,  $x_1^*$ ,  $x_2^*$  містять результати максимізації у моделі (10). В цілому табл. 1 подає результати «розмитого» оптимального розв'язку задачі нечіткого НМП (10).

Для отримання детермінованого рішення необхідно до сукупності реалізацій задач ЛП

табл. 1 застосувати процедури дефазифікації (8), (9). Змістовно вони відповідають процедурам визначення математичного очікування [4], коли окремі варіанти зважуються ваговими коефіцієнтами  $\alpha$  – рівнів. Зараз запропоновано досить багато такого роду процедури [5], серед яких поширені методи (8), (9).

Таблиця 2

## Результати дефазифікації оптимальних рішень для нечітких моделей ЛП

n	Модель	$F_G(X_*)$	$x_1^*$	$x_2^*$	$F_C(X_*)$	$D_X$
1	детермін.	16,667	3,333	3,333	16,667	10
2	Ларсена	18,674	2,849	4,3018	18,604	11,453
3	Мамдані	19,006	2,782	4,436	18,87	11,654

У табл. 2 представлені результати процедур дефазифікації оптимальних рішень для нечітких моделей ЛП, де указані значення цільової функції, оптимального вектору параметрів, а також приведено порівняння із звичайною детермінованою моделлю ЛП, рядок 1. Столбець  $F_C(X_*)$  містить значення  $F_G(X)$  при підставках величин оптимальних параметрів, а у стовпці  $D_X$  – зазначення що відповідні розрахункові значення функції обмежень. Табл. 2 показує, що метод Мамдані дає більші відхилення від детермінованого рішення (рядок 1). Це стосується значень всіх параметрів моделі НМП (10).

При реалізації нечітких моделей планування у вигляді (1) – (4) та (5) – (7) виконуються вищевказані процедури формування множин детермінованих моделей за рахунок встановлення системи  $\alpha$  – рівнів для всіх нечітких параметрів моделі НМП. Після реалізації детермінованих моделей до отриманого набору оцінок оптимальних характеристик застосовуються процедури узагальнення виду (8), (9).

## Висновки

У статті досліджено питання підвищення ефективності управління експлуатацією декількох класів технічних систем, парків ВТС, шляхом удосконалення економіко-математичних моделей планування при неповній вихідній інформації. Розроблено удосконалені нечіткі моделі експлуатаційних процесів, в яких при плануванні розподілу робіт урахується спеціалізація виконавців. Для цього виконано модифікацію відкритої моделі транспортної задачі про розподілення цілей з обмеженими пропускними здатностями, яка пристосована для умов існування багатопродуктових потоків. В моделях коефіцієнти матриці питомих вартостей і обмеження виробничих потужностей представлені нечіткими величинами. В них за допомогою

двохетапного оптимального планування урахувано також можливості виникнення збурень параметрів виробничих потужностей та зовнішнього середовища.

Для формування детермінованих рішень щодо величин параметрів планування застосовано методи теорії нечіткого управління. Запропоновані моделі та засоби планування можуть бути застосовані як складові інтелектуальної автоматизованої системи процесів експлуатації класів парків об'єктів залізничного транспорту.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Скалозуб В.В. Економіко-технологічні моделі аналізу і управління експлуатацією парків парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів [Текст] /В.В. Скалозуб, В.М. Осовик, І.В. Клименко //В зб. «Проблеми економіки транспорту», вип. 9, 2015. – С. 129 – 137.
2. Скалозуб В.В. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока /В.В. Скалозуб, О.М. Швец // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 7–11.
3. Скалозуб В.В., Швец О.М., Осовик В.Н. Методи інтелектуальних систем в задачах управління парками об'єктів залізничного транспорту по текущему состоянию // В зб. «Питання прикладної математики і математичного моделювання». м. Дніпропетровськ, вид. ДНУ, 2014. С. 40 – 47.
4. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст]/ Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; Лаборатория знаний, БИНИМ, 2008. – 316 с.
5. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. – М.: Горячая линия - Телеком, 2010. – 520 с.
6. Дилипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
7. Зайченко Ю.П. Исследование операций. – Киев: Вища школа, 1989. – 392 с.

А. Н. ПШНЬКО<sup>1</sup>, В. В. СКАЛОЗУБ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Каф. «Здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, эл. почта pshinko@r.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup> Факультет «Техническая кибернетика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. (056) 373-15-35, эл. почта skalozub\_vl\_v@mail.ru

## НЕЧЕТКИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ КЛАССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель.** Статья посвящена вопросам совершенствования экономико-математических моделей планирования оптимального распределения заказов на обслуживание. В ней исследованы процессы эксплуатации нескольких классов технических систем с учетом условий неопределенности. Модели планирования учитывают специализацию исполнителей работ, а также возможности возникновения возмущений параметров производственных мощностей и внешней среды, которые представлены нечеткими величинами. **Методика.** Для планирования процессов эксплуатации нескольких классов подобных объектов (производственно-технических систем), с учетом требований по распределению работ на основе специализации исполнителей, сформированы экономико-математические модели, которые обобщают открытую модель транспортной задачи о распределении цели с ограниченными пропускными способностями. Модели соответствуют условиям функционирования многопродуктовых потоков. В них коэффициенты матрицы удельных стоимостей и ограничения параметров ресурсов исполнителей являются нечеткими величинами. **Результаты.** Усовершенствованы экономико-математические модели анализа и планирования процессов эксплуатации нескольких классов производственно-технических систем, обеспечивающих возможности нечеткого описания параметров и условий. Модели учитывают как текущее состояние технических систем, так и возможные возмущения процессов эксплуатации. **Научная новизна.** Получено развитие экономико-математических моделей планирования процессов эксплуатации неоднородных классов технических систем, которые учитывают требования по специализации исполнителей, а также возможности нечеткого описания параметров систем. **Практическая значимость.** Результаты исследований обеспечивают возможности повышения эффективности процессов эксплуатации классов неоднородных технических систем, а также автоматизированного планирования распределения ресурсов между исполнителями с учетом специализации, нечеткости параметров и возмущений внешней среды.

*Ключевые слова:* экономико-математическое моделирование, классы технических систем, процессы эксплуатации, специализация, нечеткое математическое программирование и управление, двух этапные модели планирования.



O. PSHINKO<sup>1</sup>, V. SKALOZUB<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. "Building and construction materials", Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Str. Lazaryan, 2, Dnepr, Ukraine, 49010, Tel. +38 (056) 373 15 46, e-mail pshinko@r.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup>Faculty «Technical Cybernetics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (056) 373-15-35, e-mail skalozub\_vl\_v@mail.ru

## FUZZY ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELS FOR PLANNING OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEMS' CLASSES OPERATION

**Goal.** The article is dedicated to improve economic and mathematical planning models of the optimal distribution of the service orders. It shows the results of the research of the several classes of technical systems' operation, taking into account environment uncertainty. Planning models take into account the specialization of the work of performers, as well as the possibility of parameters' perturbation of production facilities and the environment, that are represented by fuzzy values. **Methods.** For the operation planning of several similar object classes (production and technical systems), taking into account the requirements of the work distribution based on the specialization of performers, the economic and mathematical models are formed that summarize the open model of the transport problem of the targets' distribution with limited bandwidth. The models meet the conditions of the multiproduct flows' functioning. The coefficients of the matrix of unit costs and limited resource settings are fuzzy values. **Results.** This article shows the improved economic and mathematical models of analysis and planning processes of several classes of industrial and technical systems' operation that provide the possibility of the fuzzy description of parameters and conditions. The models take into account both the current state of the technical systems and the possible perturbations of operation processes. **Scientific novelty.** New economic and mathematical planning models of processes operating inhomogeneous classes of technical systems have been developed. They take into account the requirements for spectators' specialization, as well as the possibility of the fuzzy description of the system parameters. **Practical significance.** The research results provide opportunities to improve the operational efficiency of inhomogeneous technical systems processing, as well as automated planning of resource allocation between the performers, taking into account the specialization, fuzzy parameters and the environment disturbances.

*Keywords:* economic and mathematical modeling, classes of technical systems, operation, specialization, fuzzy mathematical development and management, two-stage planning model.

Надійшла до редколегії 20.12.2016.

Стаття рекомендована до друку д-ром екон. наук, доц. Гненим О. М., д-ром екон. наук, проф. Крамаренко Г. А.