

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

УДК 681.3

С. Д. Штовба, к. т. н., доц.; О. М. Козачко, асп.

ГЕНЕТИЧНА МІНІМІЗАЦІЯ ВАРТОСТІ КОНТРОЛІВ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ З УРАХУВАННЯМ ДЕФЕКТІВ РІЗНИХ ТИПІВ

Запропоновано швидкий генетичний алгоритм оптимального вибору кратностей контрольно-добробчих операцій, які з мінімальною вартістю забезпечують необхідні рівні бездефектності ТП по кожному типу дефектів. Розроблений генетичний алгоритм оптимізує швидше за рахунок: процедури ініціалізації доброї початкової популяції, швидкого способу розрахунку показників надійності, адаптивної фітнес-функції та ефективної схеми турнірної селекції.

Вступ

Розглядається технологічний процес (ТП), в ході якого можуть виникати, виявлятися та усуватися одночасно дефекти різних типів [1]. Показниками якості такого ТП є ймовірності відсутності дефектів різних типів в продукті праці на виході процесу. В статті досліджується один із організаційних способів поліпшення якості ТП, пов'язаний зі збільшенням кратностей контрольно-добробчих процедур.

Збільшення кратностей контролів зменшує ймовірності дефектів на виході ТП, але вимагає додаткових ресурсів. Тому виникає задача вибору таких кратностей контролів, які б забезпечували необхідні рівні витрат ресурсів та бездефектності (для кожного типу дефектів) на виході ТП. Оптимізація кратностей контролів відноситься до класу цілочисельних NP-складних задач нелінійного програмування [2]. Для задач цього типу на сьогодні не існує алгоритмів поліноміальної складності [3], тому досліджуються різні метаевристичні методи, які за прийнятний час знаходять гарні розв'язки. Застосування одного із таких методів, а саме генетичних алгоритмів оптимізації [4], розглядається в цій статті.

Перша спроба генетичної оптимізації кратностей контролів ТП здійснена в [5], де вибір кратностей контролів проводився традиційним генетичним алгоритмом, який знаходив оптимальний розв'язок, але за значний час. В статті [6] запропоновано швидкий генетичний алгоритм оптимального вибору кратностей контролів, який з обмеженими ресурсами на виконання ТП забезпечує необхідні ймовірності відсутності дефектів різних типів. Прискорення генетичної оптимізації здійснено за рахунок процедури ініціалізації якісної початкової популяції хромосом; швидкого способу розрахунку показників надійності; адаптивної фітнес-функції та ефективної схеми селекції. В даній статті генетичний алгоритм з [6] адаптується під задачу вибору кратностей контролів, які з мінімальною вартістю забезпечують необхідні рівні бездефектності ТП для кожного типу дефектів.

1. Постановка задачі

Розглядається дискретний ТП, який складається з послідовного виконання n робочих операцій A_1, A_2, \dots, A_n . Під час виконання технологічних операцій в предмет праці можуть бути внесені дефекти різних типів. Якість виконання технологічної операції A_i перевіряється контрольною операцією ω_i x_i раз, де $x_i \in \{0, 1, 2, \dots\}$, $i = \overline{1, n}$ (див. рис. 1). Операція дороблення U_i виправляє дефекти, виявлені контролем ω_i .

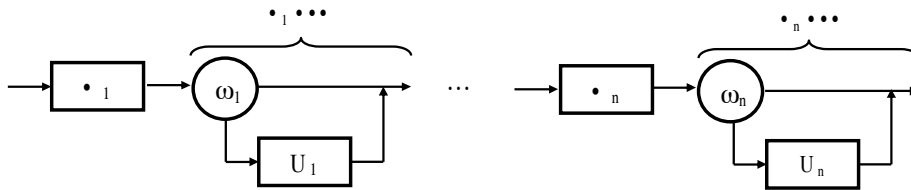


Рис. 1. Структура технологічного процесу з багатократним контролем

Згідно з [2], оптимізація ТП полягає в знаходженні таких кратностей $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ контрольно-добробляних операцій, які забезпечують необхідний рівень якості виконання ТП з мінімальною вартістю:

$$\left. \begin{aligned} C(\mathbf{X}) &\rightarrow \min; \\ p^1(\mathbf{X}) &\geq p^* \text{ та } p_j^0(\mathbf{X}) \leq q_j, \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $C(\mathbf{X})$ — вартість виконання ТП, який задано вектором \mathbf{X} ; $p^1(\mathbf{X})$ — ймовірність бездефектного виконання ТП, який задано вектором \mathbf{X} ; $p_j^0(\mathbf{X})$ — ймовірність наявності дефекту j -го типу на виході ТП, який задано вектором \mathbf{X} ; p^* — мінімально допустима ймовірність бездефектного виконання ТП; q_j — максимально допустима ймовірність наявності дефекту j -го типу на виході ТП; m — кількість різних типів дефектів.

Згідно з теорією оптимізації надійності [7], задача (1) може інтерпретуватися як оптимальне резервування контролів в прямій постановці, а задача з статті [6] — як оптимальне резервування в зворотній постановці.

2. Моделі надійності багатовимірних ТП

Моделювання надійності ТП зводиться до ітераційної процедури виявлення та укрупнення типових структур, доки не залишиться одна операція. Еквівалентні характеристики цієї операції і будуть шуканими характеристиками якості виконання всього ТП. Для моделювання надійності ТП достатньо двох типових структур: «послідовна» і «технологічна операції з x -кратним контролем і доробленням».

Показники надійності технологічної операції з x -кратним контролем і доробленням розраховуються за формулами:

$$p_A^1(x) = p_A^1 + \sum_{j=1}^m p_A^{0j} \cdot \left(1 - \left(1 - k_{\omega}^{00j} \cdot v_U^{1j} \right)^x \right); \quad (2)$$

$$p_A^{0j}(x) = p_A^{0j} \cdot \left(1 - k_{\omega}^{00j} \cdot v_U^{1j} \right)^x, \quad j = \overline{1, m}; \quad (3)$$

$$c_A(x) = c_A + x c_{\omega} + c_U \cdot \sum_{j=1}^m \left(p_A^{0j} (1 - (1 - k_{\omega}^{00j})^x) \right), \quad (4)$$

де p_A^1 — ймовірність виконання технологічної операції A без будь-яких дефектів;

p_A^{0j} — ймовірність внесення дефекту j -го типу технологічною операцією A , $j = \overline{1, m}$;

k_{ω}^{00j} — ймовірність виявлення дефекту j -го типу контролем ω , $j = \overline{1, m}$;

v_U^{1j} — ймовірність усунення дефектів j -го типу дороблення U , $j = \overline{1, m}$;

c_A , c_{ω} , c_U — ресурси на виконання технологічної операції A , контролю ω та дороблення U .

Формули (2)–(4) отримані укрупненням багатовимірного ймовірнісного графа технологічної структури «робота з x -кратним контролем та доробленням» [1].

Показники надійності ТП з рис. 1, розраховуються за такими формулами [1]:

$$p^1(\mathbf{X}) = \prod_{i=1, n} p_{A_i}^1(x_i), \quad (5)$$

$$p^{0j}(\mathbf{X}) = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - p_{A_i}^{0j}(x_i)\right), \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$C(\mathbf{X}) = \sum_{i=1, n} c_{A_i}(x_i). \quad (7)$$

3. Генетичний алгоритм

Для розв'язання задачі оптимізації (1) генетичними алгоритмами необхідно обрати способи кодування, схрещування, мутації, селекції та задати фітнес-функцію.

Генетичне кодування. Варіант ТП закодуємо хромосомою з n генів $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, де кожний ген відповідає одній керованій змінній задачі оптимізації (1).

Генерація початкової популяції

Процедура ініціалізації, що пропонується нижче, дозволяє згенерувати популяцію хромосом, які знаходяться в області допустимих розв'язків або в її околі. Значення гену x_i генерується як випадкове ціле число з діапазону $[\underline{x}_i, \bar{x}_i \cdot \gamma_i^{\xi_i}]$, де

$$\underline{x}_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \exists j : p_{A_i}^1 < p^* \text{ або } p_{A_i}^{0j} > q_j \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} - \text{нижня межа кратності контролю, } \bar{x}_i - \text{апріор-}$$

но визначена верхня межа кратності контролю, ξ_i — випадкове число з діапазону $[0, 1]$, γ_i — градієнт контролю, що вказує на відносну ефективність у встановленні контролю ω_j та дороблення U_i після операції A_i [2].

Схрещування і мутація. Використовується звичайна операція схрещування з однією точкою розтину та одногенна мутація [4]. Після мутації значення гену x_i не повинно бути менше за \underline{x}_i .

Фітнес-функція. Нами пропонується така адаптивна фітнес-функція:

$$F(\mathbf{X}) = \begin{cases} \frac{1}{C(\mathbf{X})}, & \text{якщо } \mathbf{X} \text{ допустимий розв'язок;} \\ \frac{1 - D(\mathbf{X})}{C(\mathbf{X})}, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (8)$$

де $D(\mathbf{X}) \in (0, 1)$ — штраф за порушення хромосомою \mathbf{X} обмежень задачі (1).

Пропонується така штрафна функція:

$$D(\mathbf{X}) = \frac{1}{m+1} \left(\max \left(0, \frac{p^* - p^1(\mathbf{X})}{p^*} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\Delta b_j(\mathbf{X})}{\Delta b_j^{\max}} \right)^\alpha \right), \quad (9)$$

де $\alpha > 0$ — коефіцієнт, що визначає вагомість штрафів за порушення обмежень за ймовірностями дефектів (q_1, q_2, \dots, q_m) ;

$\Delta b_j(\mathbf{X}) = \max(0, p_j^0(\mathbf{X}) - q_j)$ — величина порушення хромосомою \mathbf{X} j -го обмеження, $j = \overline{1, m}$;

$\Delta b_j^{\max} = \max_{p=1, pop_size} (\Delta b_j(\mathbf{X}))$ — показник якості поточної популяції, який визначається максимальними порушеннями обмежень.

Для фітнес-функції (8) штрафи за одні й ті ж порушення обмежень з різними популяціями хромосом неоднакові. Ці штрафи адаптуються під якість популяції таким чином, щоб під час селекції дистанціювати погані розв'язки від гарних.

Селекція. В роботі досліджується три типи селекцій: 1) колесо-рулетки з елітною стратегією на всій популяції; 2) колесо-рулетки з елітною стратегією на урізаній популяції.

ції; 3) турнірна селекція. За першим типом селекції спочатку обирають еліту — хромосому з максимальною фітнес-функцією і хромосому з максимальною фітнес-функцією, що задовольняє обмеження задачі (1), а після цього в нову популяцію обирають решту хромосом через колесо-рулетки [4]. В другому типі селекції до відбору допускається тільки певна частка кращих хромосом [8]. Після урізання популяції селекція відбувається через колесо-рулетки з елітною стратегією. В третьому типі селекції нова популяція формується в результаті турнірів серед певної кількості випадково обраних хромосом. Переможці турнірів визначаються за найбільшим значенням фітнес-функції [8].

5. Комп'ютерний експеримент

Генетичний алгоритм був протестований на двох множинах задач: A_4_1 та A_4_2. Умови задач доступні за адресою www.ksu.vstu.vinnica.ua/shtovba/benchmark. В кожній множині задач розглядаються ТП з 4 різними типами дефектів ($m = 4$) з кількістю технологічних операцій $n = 20, 40, 60, 80, 100, 120$. Для задач A_4_1 існує один важливий тип дефекту, допустима ймовірність виникнення якого на виході ТП є дуже низькою. Для задач A_4_2 всі типи дефектів мають приблизно однакову важливість. Результати оптимального вибору кратностей контрольно-добробчих операцій зведені в таблицю. Для порівняння результатів використовується градієнтний алгоритм оптимізації надійності ТП [2], який спочатку нарощує кратності контрольно-добробчих операцій з максимальними градієнтами доки не будуть задоволені всі обмеження, а потім для поліпшення розв'язку знімає найдорожчі контролі. Генетичний алгоритм забезпечує знаходження кращих розв'язків ніж градієнтний алгоритм, особливо для задач A_4_1.

Вартість $C(X)$ для розв'язків тестових задач

Розмірність (n)	Вартість ТП для задачі A_4_1			Вартість ТП для задачі A_4_2		
	Генетичний алгоритм	Градієнтний алгоритм	Без контролів	Генетичний алгоритм	Градієнтний алгоритм	Без контролів
20	199,67	203,02	96,80	153,27	154,37	100,91
40	451,97	460,99	192,43	322,35	325,25	196,82
60	531,88	540,25	290,50	478,45	482,24	312,81
80	708,40	719,90	356,54	697,51	700,97	374,22
100	975,04	992,01	484,32	859,29	860,59	453,88
120	1105,15	1118,06	538,94	958,92	962,69	548,07

Профілювання генетичного алгоритму (рис. 2) показує, що найбільше часу витрачається на обчислення показників надійності ТП за формулами (2)–(4). Щоб прискорити обчислення цих показників пропонується використовувати процедуру швидкого обчислення, в якій показники надійності ТП розраховуються за формулами (5)–(7) для відповідних наперед розрахованих значень $P_{Ai}(x_i)$ та $c_{Ai}(x_i)$, що зберігаються в пам'яті для всіх можливих значень x_i , $i = \overline{1, n}$ [5]. На рис. 2 зображено профілювання генетичного алгоритму з типовою та швидкою процедурою обчисленням показників надійності ТП.

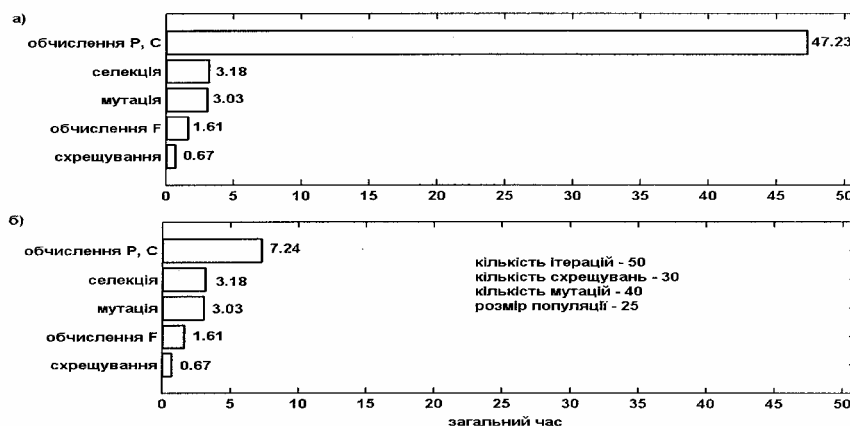


Рис. 2. Профілювання генетичного алгоритму з використанням: а) типової процедури; б) швидкої процедури обчислення показників надійності ТП

На рис. 3–5 порівнюються середні динаміки генетичних алгоритмів з різними стратегіями селекції. Всі схеми селекції були протестовані на 5 різних початкових популяціях. Для кожної початкової популяції генетичний алгоритм запускався 25 разів. На рис. 3 зображена динаміка оптимізації з різними порогами τ відсічної селекції. Параметр τ показує процент хромосом, які відсікаються до застосування колеса-рулетки. Задовільні результати досягаються при $\tau = 50\%$. На рис. 4 зображена динаміка оптимізації для різної кількості t учасників змагань турнірної селекції. Добрі результати досягаються якщо $t = 6$. Рис. 5 свідчить, що селекція за колесом-рулетки має найгіршу динаміку. Динаміки відсічної селекції і турнірної селекції порівнювані, але генетичний алгоритм з турнірною селекцією знаходить оптимум швидше.

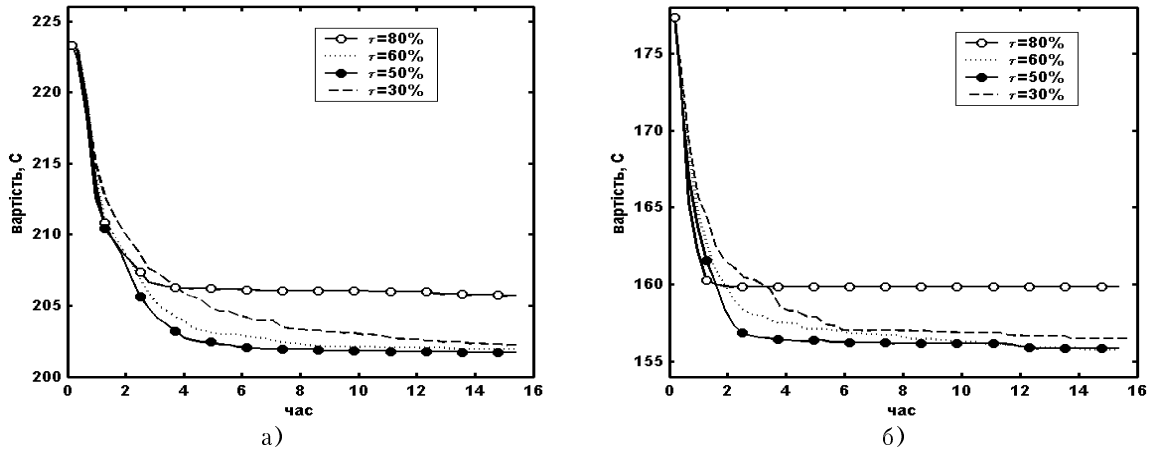


Рис. 3. Середня динаміка генетичного алгоритму з відсічною селекцією:
а) для задач A_4_1, коли $n = 20$; б) для задач A_4_2, коли $n = 20$

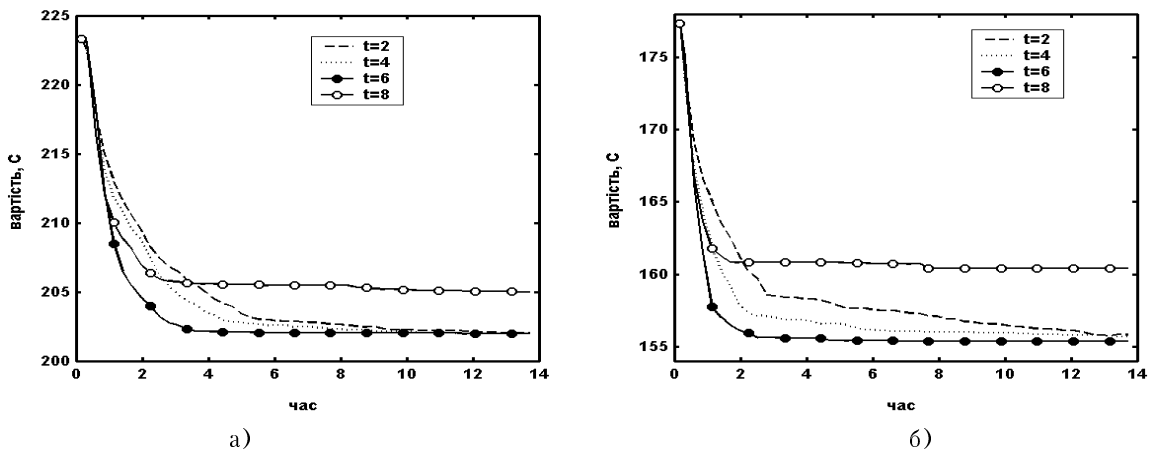


Рис. 4. Середня динаміка генетичного алгоритму з турнірною селекцією
а) для задач A_4_1, коли $n = 20$; б) для задач A_4_2, коли $n = 20$

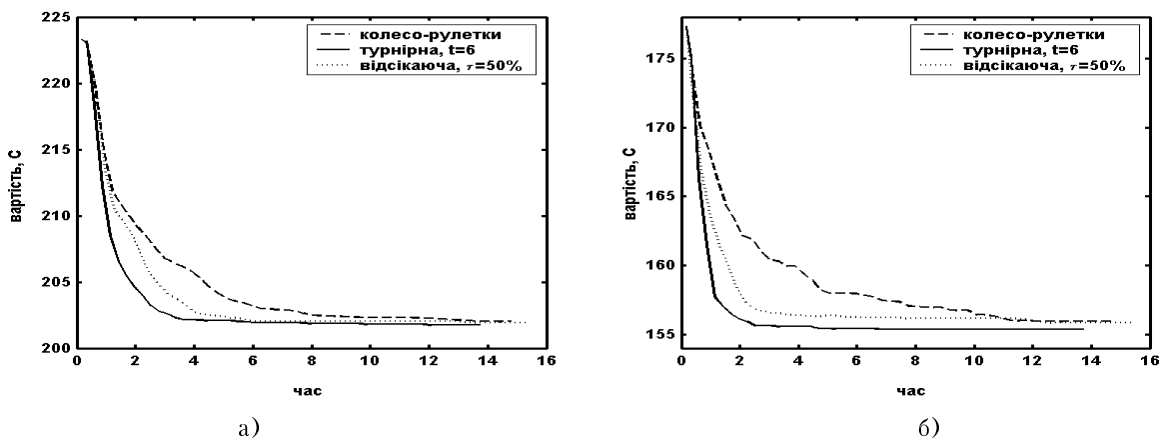


Рис. 5. Середня динаміка генетичного алгоритму з різними стратегіями селекції
а) для задач A_4_1, коли $n = 20$; б) для задач A_4_2, коли $n = 20$

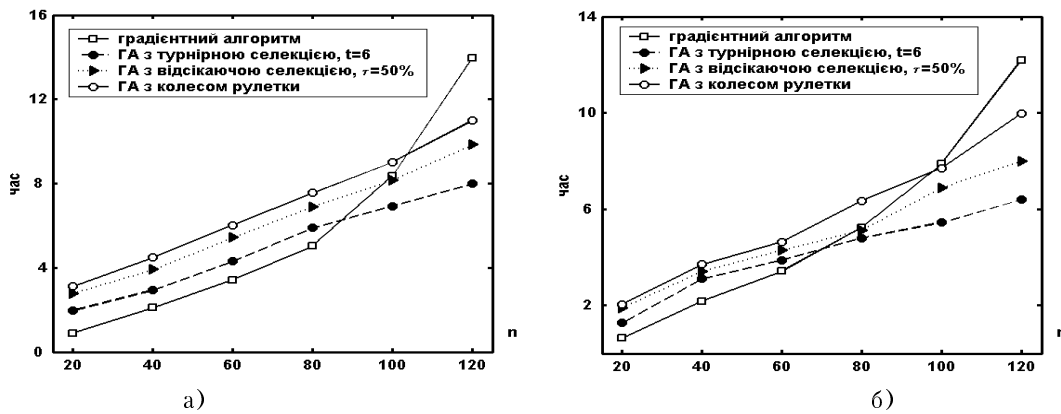


Рис. 6. Середній час розв'язання градієнтним алгоритмом та генетичними алгоритмами з різними схемами селекції: а) для задач А_4_1; б) для задач А_4_2

На рис. 6 порівнюються час оптимізації генетичними та градієнтним алгоритмами для задач А_4_1 та А_4_2. Оптимізація градієнтним алгоритмом проводилася з використанням швидких процедур обчислення градієнта та розрахунку показників надійності ТП. Час оптимізації генетичними алгоритмами розраховувався як середнє значення 100 обчислювальних експериментів. З рис. 6 видно, що для задач великої розмірності генетичні алгоритми знаходять розв'язки навіть швидше, ніж градієнтні. Причому, найшвидше оптимальний розв'язок знаходить генетичний алгоритм з турнірною селекцією.

Висновки

Запропоновано швидкий генетичний алгоритм оптимального вибору кратностей контрольно-добробчих операцій, які з мінімальною вартістю забезпечують необхідні рівні бездефектності ТП по кожному типу дефектів. Розроблений генетичний алгоритм оптимізує швидше за рахунок: процедури ініціалізації доброї початкової популяції, швидкого способу розрахунку показників надійності, адаптивної фітнес-функції та ефективної схеми турнірної селекції. Комп'ютерні експерименти свідчать, що генетичні алгоритми знаходять кращі розв'язки, причому для задач великої розмірності вони оптимізують навіть швидше ніж градієнтні алгоритми вибору кратностей контролів. Запропонована схема генетичного алгоритму може бути корисною для складних задач оптимізації в проектуванні надійнісних алгоритмів, в робототехніці, розстановці контрольних точок в ТП, діагностиці дефектів в складних системах, оптимізації комп'ютерних мереж, в алгоритмах спем-фільтрації тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ротштейн А. П., Кузнецов П. Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. — К.: Техніка, 1992. — 180 с.
2. Ротштейн О. П., Штовба С. Д., Дубіненко С. Б., Козачко О. М. Евристична оптимізація розстановки контрольних точок в технологічних процесах при багатовимірному просторі типів дефектів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 1. — С. 54—62.
3. Кузнецов О. И., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат. — 1988. — 480 с.
4. Gen M., Cheng R. Genetic Algorithms and Engineering Design. John Wiley & Sons, 1997. — 352 p.
5. Ротштейн О. П., Штовба С. Д. Оптимізація багатовимірних технологічних процесів генетичними алгоритмами // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 2. — С. 7—13.
6. Штовба С. Д., Козачко О. М. Генетична оптимізація кратностей контрольно-добробчих операцій в технологічних процесах з урахуванням дефектів багатьох типів // Вісник Житомирського державного технологічного університету. — 2004. — Т. 2. — № 4. — С. 180—187.
7. Ушаков И. А. Методы решения простейших задач надежности при наличии ограничений. — М.: Сов. Радио, 1969. — 162 с.
8. Blicke T., Thiele L. A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms. TIK-Report. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1995. — 65 p.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Надійшла до редакції 18.01.05.
Рекомендована до друку 30.01.05.

Штовба Сергій Дмитрович — докторант, **Козачко Олексій Миколайович** — аспірант.

Кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет