

Ситнік О. О.

ПІДХІД ДО ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АНТРОПОЦЕНТРИЧНОСТІ

Предметом дослідження є підхід до антропоцентричної диспетчеризації бізнес-процесів в умовах функціонування виробничих об'єктів, який ґрунтується на узгодженні розподілу завдань між виконавцями з огляду на комбінації їхніх хронобіологічних, когнітивних та психологічних якостей. **Мета роботи** – підвищення ефективності бізнес-процесів функціонування виробничих об'єктів (ВО) за допомогою розроблення, формального описання й апробування антропоцентричного методу диспетчеризації (АМД) як загального підходу до класу задач планування у ВО з людьми-виконавцями, а також демонстрація його застосовності на прикладі діяльності реального виробничого підприємства авіаційної галузі й автоматизованих систем управління (АСУ) навчальним процесом у закладах вищої освіти. **Завдання дослідження:** формалізація задачі антропоцентричної диспетчеризації як такої, що є інваріантною щодо типу виробничого об'єкта; розроблення хронотип-зберігального оператора схрещування CPC; реалізація алгоритму антропоцентричного оператора мутації AWM. Крім цього, у роботі розглянуто механізм адаптивного коригування ваг SRA, проаналізовано й порівняно АМД з базовими конфігураціями ГА. Застосовано такі **методичні засоби дослідження:** еволюційний алгоритм з антропоцентрично орієнтованими генетичними операторами, OLS-регресія задоволеності всіх учасників навчального процесу, абляційний аналіз і порівняльне тестування на 30 незалежних запусках прототипу програмного забезпечення. **Практичні результати** довели, що АМД скорочує час досягнення $F(x) > 0.75$ на 34.0% (38.4 проти 58.2 хв), підвищує фінальне значення цільової функції до 0.84 (зі збільшенням на 18.3% щодо *Baseline* GA) і знижує дисперсію результатів до $\sigma = 0.029$. Норма $\|w - w^*\|_2$ скорочується на 92.8% за три семестри. **Висновки.** У роботі вперше формально описано інваріанти збереження циркадної узгодженості та когнітивної якості безпосередньо в структурі генетичних операторів, а не через штрафні доданки цільової функції. Крім того, доведено загальність підходу для широкого класу виробничих задач диспетчеризації з людиною-виконавцем.

Ключові слова: антропоцентрична диспетчеризація; бізнес-процеси виробничого об'єкта; еволюційний алгоритм; генетичні оператори; хронотип-зберігальний кросовер; адаптивне навчання; регресія задоволеності; автоматизовані системи управління навчальним процесом.

Вступ

Ефективність виробничих процесів на сучасних підприємствах і в установах здебільшого залежить не лише від технологічного забезпечення, а й від раціонального розподілу завдань між людьми-виконавцями. Варто зауважити, що якість когнітивно навантажених операцій, зокрема проектування, конструювання, технічна підготовка виробництва, навчання фахівців, підпорядкована біологічним ритмам людини: хронотипу, добовим коливанням когнітивної продуктивності, психологічному навантаженню [1–3]. Ігнорування цих факторів в умовах диспетчеризації бізнес-процесів призводить до зниження якості результатів, надмірної втоми виконавців і зростання кількості помилок [3, 4].

Диспетчеризація бізнес-процесів (*Business Process Dispatching*) у контексті автоматизованих систем управління (АСУ) виробничими об'єктами

традиційно розглядається як оптимізаційна задача розподілу завдань у часі з огляду на ресурсні обмеження: наявності виконавців, обладнання, аудиторій чи виробничих ліній. Проте сучасний рівень розвитку людино орієнтованих виробничих систем вимагає пильної уваги до нового класу "антропоцентричних" обмежень, пов'язаних із біологічними, психологічними й когнітивними якостями людини-виконавця [5–7].

Антропоцентрична диспетчеризація – це підхід до планування бізнес-процесів, за умови якого розподіл завдань між виконавцями здійснюється з огляду на всі обмеження: технічні (відсутність конфліктів ресурсів), хронобіологічні (відповідність часових слотів хронотипам виконавців), психологічні (рівномірність навантаження, запобігання перевантаженню) та когнітивні (сумісність суміжних задач за типом розумової діяльності). Перелічені чотири категорії обмежень інтегруються в єдину

багатокритеріальну цільову функцію, що оптимізується за допомогою еволюційного алгоритму зі спеціалізованими операторами.

Задача антропоцентричної диспетчеризації є інваріантною щодо типу виробничого об'єкта: вона виникає в будь-якій системі, де є виконавці з різними хронотипами й когнітивними профілями, яким призначаються завдання різної когнітивної складності в часових слотах. Підтвердженням цьому є те, що задачі диспетчеризації в промисловому виробництві [8, 9], де команда розробників отримує завдання різної інженерно-конструкторської складності, та в академічній сфері [10, 11], де студенти й викладачі мають навчальні заняття різного навантаження, описуються ідентичним формальним апаратом.

Метою роботи є підвищення ефективності бізнес-процесів функціонування виробничих об'єктів (ВО) за допомогою розроблення, формального опису й апробації антропоцентричного методу диспетчеризації (АМД) як загального підходу до класу задач планування у ВО з людьми-виконавцями, а також демонстрація його застосовності на прикладі діяльності реального виробничого підприємства авіаційної галузі та АСУ навчальним процесом у закладах вищої освіти.

Огляд суміжних підходів

У публікації [10] описано результати застосування *Constraint-preserving* операторів GA для задач синтезу розкладу. *Burke* та *Petrovic* виокремлюють клас операторів, що зберігають технічні жорсткі обмеження після схрещування, але водночас не розглядають антропоцентричних якостей виконавців. *Haitan* і *Nazarov* [11] застосовують гібридний підхід на основі мурашиного алгоритму та GA для автоматизованого складання розкладу у ЗВО, однак без огляду на хронотипи. *Mokhtari et al.* [8] розробляють модель змішаного цілочисельного програмування для задачі *university course timetabling*, зважаючи на преференції учасників. *Oude Vrielink et al.* [9] систематизують практики складання розкладу у ЗВО та ідентифікують розрив між дослідницькими підходами й практикою. Загальні методи *constraint-preserving* планування розглядаються також у контексті маршрутизації та розкладу [12, 13] і в метагевристичних підходах [10, 14]. Отже, жоден із цих підходів не передбачає впровадження хронотипових інваріантів безпосередньо в структуру генетичних операторів.

Зважена мутація із спрямованим вибором точки вже багаторазово застосовувалася в задачах планування з нерівномірним розподілом якості результатів [15]. *Eiben* і *Smith* у своїх роботах описують *temperature-based softmax*-вибір у мутаційних операторах [16]. Адаптацію параметрів алгоритму на основі зворотного зв'язку розглянуто в контексті інтерактивних еволюційних систем [12]. Вплив хронотипу виконавців на результативність виробничого процесу підтверджено хронобіологічними дослідженнями [17, 18]. Аналіз публікацій дав змогу виявити відсутність досліджень з адаптацією ваг компонентів цільової функції диспетчеризації за допомогою регресії задоволеності учасників виробництва або навчання.

1. Загальний опис

антропоцентричного методу диспетчеризації

Для математичного опису антропоцентричного методу диспетчеризації необхідно впровадити позначки для основних параметрів. Нехай задано множину виконавців задач $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, що мають хронотипові профілі *chronotypes* (e_i). Позначимо набір задач $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ з когнітивними профілями для кожної з них. Також задамо скінченну множину часових слотів $S = \{(d, s) \mid d \in \{1..D\}, s \in \{1..H\}\}$, де d – день із навантаженням і s – порядковий номер слота в межах дня. Для цих параметрів знайдемо розклад $x: T \rightarrow E \times S$, що максимізує багатокритеріальну цільову функцію:

$$F(x) = w_1 \cdot F_{tech}(x) + w_2 \cdot F_{circ}(x) + w_3 \cdot F_{psych}(x) + w_4 \cdot F_{cogn}(x),$$

де $F_{tech}(x)$ – компонент технічних обмежень і відсутності конфліктів ресурсів. У поданій формулі $F_{circ}(x)$ – це компонент циркадної узгодженості та відповідності часових слотів хронотипам виконавців; $F_{psych}(x)$ – компонент психологічного комфорту й рівномірності навантаження кожного учасника виробничого чи навчального процесу; $F_{cogn}(x)$ – компонент когнітивної ефективності та сумісності суміжних задач. Позначки $w_1 \dots w_4$ є ваговими коефіцієнтами, які адаптуються механізмом *Satisfaction Regression Adaptation* (SRA).

Отже, метод АМД реалізує оптимізацію зазначеної функції за допомогою трьох спеціалізованих алгоритмічних компонентів: хронотип-зберігального оператора схрещування СРС, антропоцентричного оператора мутації АWM і механізму адаптивного навчання SRA. Детальний математичний опис кожного з цих компонентів наведено в розд. 3. Основною властивістю методу є антропоцентричні обмеження, вбудовані безпосередньо в структуру генетичних операторів, а не виражені штрафними доданками цільової функції, що запобігає їх систематичному порушенню в процесі рекомбінації [10, 11].

2. Застосування АМД у виробничій системі на прикладі приватної фірми "Спейс"

"Спейс" є приватною фірмою (ПФ) авіаційного профілю, що спеціалізується на виробництві й ремонті аеродромної техніки, зокрема самохідних пасажирських трапів (СПТ-154 та СПТ-114). Загальна кількість персоналу налічує 52 співробітники, з яких у виробництві залучені конструктори, технологи й виробничі фахівці [19, 20]. У межах проекту зі створення нової моделі СПТ (проект розроблення комплексу причалювального обладнання, КПО) формується команда виконавців

із фахівців підрозділів НДДКР (науково-дослідницька й дослідно-конструкторська робота) і ТПВ (технологічна підготовка виробництва).

2.1. Формалізація задачі диспетчеризації для ПФ "Спейс"

Розглянемо задачу антропоцентричної диспетчеризації виробничих завдань у межах проекту розроблення КПО. Формально нехай $E = \{e_1, \dots, e_8\}$ – команда виконавців із хронотиповими профілями з табл. 1; $T = \{t_1, \dots, t_{12}\}$ – множина виробничих завдань; $T_A \subset T$ – завдання типу А (висока концентрація); $T_B = T \setminus T_A$ – завдання типу В; $D = 5$ робочих днів, $H = 4$ часові слоти по 2 год.

Обмеження: (I) кожне t_j призначається рівно одному e_i у рівно один слот (s, d) ; (II) кожен e_i не перевищує одне завдання у слоті; (III) $t_j \in T_A$ призначається у слот (d, s) з $\max F_{circ}(e_i, s)$ для відповідного виконавця e_i . Нехай команда виконавців налічує $n=8$ фахівців (табл. 1), яким необхідно призначити $m=12$ виробничих завдань у робочих слотах тижневого горизонту планування. Хронотипи виконавців визначені на основі стандартизованих анкет MEQ [18] та відображені у табл. 1.

Таблиця 1. Склад команди виконавців проекту КПО ПФ "Спейс" та їх хронотипові профілі

№	Роль	Хронотип (MEQ)	F_circ-пік
1	Провідний конструктор (КПО)	Ранковий (67)	Слот 1–2 (8:00–12:00)
2	Конструктор I кат. (шасі)	Проміжний (54)	Слот 2–3 (10:00–14:00)
3	Конструктор I кат. (привод)	Вечірній (38)	Слот 3–4 (14:00–18:00)
4	Конструктор II кат. (гідрравліка)	Проміжний (50)	Слот 2–3 (10:00–14:00)
5	Провідний технолог ТПВ	Ранковий (71)	Слот 1–2 (8:00–12:00)
6	Технолог ТПВ (виготовлення)	Проміжний (48)	Слот 2–3 (10:00–14:00)
7	Інженер-випробувальник	Вечірній (35)	Слот 4 (16:00–18:00)
8	Технік-нормувальник	Ранковий (62)	Слот 1 (8:00–10:00)

Виробничі завдання проекту КПО розрізняють за когнітивним профілем. Завдання типу А, що передбачають високу концентрацію, як-от ескізне проектування й розроблення конструкторської документації, мають пріоритет у слотах з максимальним F_{circ} -значенням виконавця. Задачі типу В передбачають посередній рівень концентрації. Це, наприклад, розроблення специфікацій і нормування, які є гнучкими щодо часового слота й складності навантаження. Натомість завдання типу В рутинні, як-от внесення змін до

документації та звіти. Їх доцільно призначати в слоти з мінімальним значенням F_{circ} виконавця. За такого розподілу зберігаються пікові слоти для задач типу А, що є найбільш раціональним рішенням.

2.2. Застосування операторів АМД у процесі диспетчеризації виробничих завдань

За умови диспетчеризації хромосома x кодує розклад виробничих завдань: $x[d][s][r] = (t, e)$. У наведеній формулі d – це день тижня; s – часовий

слот; r – виробничий ресурс, наприклад робоче місце або верстат; t – ідентифікатор завдання; e – виконавець. Ініціалізація популяції методом рандомізованої жадібної побудови розміщує завдання типу A в слоти з найвищим F_{circ} -значенням для відповідного виконавця.

Оператор CPC у процесі схрещування двох розкладів самостійно обирає точку розрізу, пропорційну різниці циркадних внесків між батьківськими особинами за днями. Тобто дні, де батьківські розклади суттєво різняться за F_{circ} , є більш інформативними точками рекомбінації. Це дає змогу нащадку успадковувати денні блоки з кращою хронотиповою структурою. Оператор AWM спрямовує мутаційний бюджет на часові слоти з найнижчим антропоцентричним внеском $q(d,s) = w_2 \cdot a(d,s) + w_3 \cdot (1-l(d,s)) + w_4 \cdot c(d,s)$,

де $a(d,s)$ – циркадний внесок слота. У формулі позначка $l(d,s)$ є рівнем навантаження, а $c(d,s)$ – когнітивною сумісністю сусідніх завдань [2, 3].

2.3. Результати аналізу сценарного прикладу виробничої діяльності ПФ "Спейс"

Для ілюстрації роботи АМД у межах дослідження виконано модельний розрахунок на основі інформації про персонал ПФ "Спейс" [19]. Весь персонал підприємства налічує вісім виконавців. Також є 12 виробничих завдань, 5-денний горизонт планування, чотири часові слоти. Хронотипові профілі визначені анкетним методом [18]. Порівняно два варіанти розкладу: стандартний (рівномірний розподіл завдань без огляду на хронотипи) й оптимізований АМД (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняння варіантів диспетчеризації для команди проекту КПО ПФ "Спейс"

Критерій	Стандартний розклад	АМД-оптимізований
F_{circ} (циркадна узгодженість)	0.51	0.79
F_{psych} (психологічний комфорт)	0.58	0.76
F_{cogn} (когнітивна ефективність)	0.60	0.81
$F(x)$ загальне	0.57	0.79
Завдань типу А в пікових слотах	42%	83%
Сумішень різнотипних завдань на день	6	1

АМД-оптимізований розклад забезпечив призначення 83% завдань типу А, як-от ескізне проектування й конструкторська документація, у часові слоти, що відповідають піку когнітивної активності конкретного виконавця. Для провідного конструктора й провідного технолога, які мають ранкові хронотипи, критичні завдання зосереджені в першій половині дня; для інженера-випробувача з вечірнім хронотипом – у другій. Кількість психологічно несумісних сумішень різнотипних завдань у межах одного дня скорочено з 6 до 1. Такий приклад демонструє прикладну ефективність АМД для реальних виробничих команд і практичний ефект від застосування цього методу у фірмі.

3. Спільна природа задачі диспетчерського управління для виробничих об'єктів і ЗВО

Порівняння задачі диспетчеризації для ПФ "Спейс" і для АСУ навчальним процесом у ЗВО [20] виявляє структурну ідентичність за різного предметного

контексту. В обох випадках: (1) є виконавці з різними хронотипами й когнітивними профілями; (2) є завдання з різною когнітивною складністю, що вимагають розміщення в часових слотах; (3) жорсткі технічні обмеження (виконавець не може бути у двох місцях одночасно) поєднуються з м'якими антропоцентричними; (4) якість розкладу безпосередньо впливає на результативність виконавця.

Розбіжності між двома застосуваннями є неприциповими для формальної постановки: в обох випадках хромосома x кодує відображення завдань на пари виконавця й часового слота, цільова функція $F(x)$ має ідентичну структуру. Оператори CPC, AWM і механізм SRA не залежать від типу виробничого об'єкта. Це підтверджує загальність запропонованого підходу та його застосовність до широкого класу задач диспетчеризації бізнес-процесів виробничих систем з командою виконавців. Відповідність між елементами задачі диспетчеризації та їх виконавцями для випадків виробництва і навчального процесу подано у табл. 3.

Таблиця 3. Відображення елементів задачі диспетчеризації між виробничою системою та ЗВО

Елемент задачі	ПФ "Спейс"	АСУ ЗВО
Виконавці E	Інженери й конструктори	Викладачі
Реципієнти	Виробничі ресурси або підрозділи	Академічні групи студентів
Завдання T	Виробничі або проєктні операції	Навчальні заняття
Часові слоти S	Робочі зміни або годинні блоки	Навчальні пари
F_{circ}	Відповідність зміни хронотипу інженера	Відповідність пари хронотипу студентів і викладача
F_{psych}	Рівномірність денного навантаження	Рівномірність навчального навантаження
F_{cogn}	Сумісність суміжних задач за типом діяльності	Сумісність суміжних дисциплін за складністю
SRA-зворотний зв'язок	Оцінки задоволеності виконавців	Оцінки задоволеності студентів і викладачів

4. Формальний опис методу АМД для АСУ навчальним процесом у ЗВО

4.1. Кодування хромосоми та ініціалізація

Основна різниця між методом АМД і класичним генетичним алгоритмом полягає в перенесенні антропоцентричних обмежень з рівня штрафних доданків цільової функції на рівень структури самих операторів. І в разі такого підходу CPC-оператор гарантує збереження хронотипової узгодженості в процесі схрещування, а АWM-оператор зосереджує мутаційний бюджет на проблемних слотах. Цільова функція для задачі розкладу ЗВО має такий вигляд: $F(x) = w_1 \cdot F_{tech}(x) + w_2 \cdot F_{circ}(x) + w_3 \cdot F_{psych}(x) + w_4 \cdot F_{cogn}(x)$ (компоненти подано в розд. 1). Детальний опис математичних моделей компонентів наведено в роботі [5].

Тобто хромосома x кодує розклад на один тиждень у вигляді тривимірного масиву: $x[d][s][g] = (e, r)$, $d \in \{1..6\}$, $s \in \{1..8\}$, $g \in \{1..|G|\}$, де d – день тижня; s – порядковий номер пари; g – індекс групи; e – ідентифікатор викладача; r – ідентифікатор аудиторії. Кожна особина доповнюється вектором кешованих метрик $m(x)$, який оновлюється внаслідок обчислення фітнесу. Хронотипові профілі учасників визначаються на основі стандартизованих методик [18], які широко застосовуються в хронобіологічних дослідженнях [17]. Найкращим прикладом таких методик є опитувальник MEQ (a). Алгоритм ініціалізації популяції за цими даними методом рандомізованої жадібної побудови у вигляді псевдокоду представлено на рис. 1.

```

ALGORITHM Init-Population(|P|, plan, chronotypes)
INPUT: |P| - розмір популяції
      plan - доручення {(g, e, d_id, hours)}
      chronotypes - хронотип кожного учасника
OUTPUT: P - початкова популяція
P <- empty
FOR i <- 1 TO |P| DO
  x <- empty_schedule()
  assignments <- shuffle(plan)
  FOR EACH (g, e, d_id, h) IN assignments DO
    slots <- free_slots(x, g, e)
    slots <- sort_by_circadian(slots, chronotypes[g], chronotypes[e])
    slot <- slots[random_top_k(slots, k=3)] // e-greedy
    x[slot.d][slot.s][g] <- (e, assign_room(slot, d_id))
  END FOR
  m(x) <- compute_metrics(x)
  P <- P + {x}
END FOR
RETURN P

```

Рис. 1. Псевдокод ініціалізації популяції методом рандомізованої жадібної побудови

4.2. Хронотип-зберігальний оператор схрещування CPC

У процесі роботи алгоритму оператор CPC (*Chronotype-Preserving Crossover*) обирає точки

розрізу на рівні днів пропорційно абсолютній різниці циркадного внеску між батьківськими особинами: $P(\text{cut at day } d) \propto |F_{circ}(x_A, d) - F_{circ}(x_B, d)|$. У цьому разі дні із значною різницею є більш інформативними

точками розрізу, тобто нащадок успадковує кращий з двох варіантів для кожного дня. Важливість збереження хронотипової узгодженості

підтверджена в дослідженнях [1, 3]. Алгоритм оператора CPC у вигляді псевдокоду відображено на рис. 2.

```

ALGORITHM CPC(x_A, x_B, w, chronotypes)
INPUT: x_A, x_B - батьківські хромосоми
      w = (w1,w2,w3,w4) - поточні вагові коефіцієнти
      chronotypes - хронотипові профілі
OUTPUT: x_C, x_D - дочірні хромосоми
// Крок 1: обчислити різницю циркадного внеску за днями
FOR d <- 1 TO 6 DO
  D[d] <- |F_circ(x_A,d) - F_circ(x_B,d)|
END FOR
p_cut <- softmax(D)
// Крок 2: обрати точку розрізу
d_cut <- sample(p_cut)
// Крок 3: побудувати нащадків
x_C <- x_A[1..d_cut] || x_B[d_cut+1..6]
x_D <- x_B[1..d_cut] || x_A[d_cut+1..6]
// Крок 4: відновлення технічних обмежень
x_C <- repair(x_C)
x_D <- repair(x_D)
m(x_C) <- compute_metrics(x_C)
m(x_D) <- compute_metrics(x_D)
RETURN x_C, x_D

```

Рис. 2. Псевдокод алгоритму оператора CPC

4.3. Антропоцентричний оператор мутації AWM

У виконанні алгоритму, поданого вище, оператор AWM (*Anthropocentric Weighted Mutation*) спрямовує мутацію до слотів із найнижчим антропоцентричним внеском, використовуючи *softmax*-зважений розподіл. $P(\text{select}(d,s)) \propto \exp(-\beta \cdot q(d,s))$, де

$a(d,s)$ – нормований внесок слота у F_{circ} ; $l(d,s)$ – психологічне навантаження; $c(d,s)$ – когнітивна сумісність із сусідніми часовими слотами [2, 3]. За умови $\beta \rightarrow 0$ оператор AWM вироджується в рівномірну мутацію. Алгоритм антропоцентричного оператора мутації AWM у вигляді псевдокоду наведено на рис. 3.

```

ALGORITHM AWM(x, w, beta=2.0)
INPUT: x хромосома
      w поточні вагові коефіцієнти
      beta температурний параметр
OUTPUT: x' мутована хромосома
// Крок 1: антропоцентрична властивість кожного слота
active <- {(d,s,g) : x[d][s][g].e != 0}
FOR EACH (d,s,g) IN active DO
  a <- F_circ_slot(x,d,s,g)
  l <- L_slot(x,d,s,g)
  c <- cogn_compat(x,d,s,g)
  q[d,s,g] <- w2*a + w3*(1-l) + w4*c
END FOR
// Крок 2: зважений вибір двох слотів
logits <- -beta * q[.]
p_select <- softmax(logits)
slot_1 <- sample(p_select)
slot_2 <- sample(p_select \ {slot_1})
// Крок 3: перевірка та обмін
IF compatible_swap(x, slot_1, slot_2) THEN
  x' <- swap(x, slot_1, slot_2)
  x' <- repair(x')
  m(x') <- compute_metrics(x')
ELSE
  x' <- x
END IF
RETURN x'

```

Рис. 3. Псевдокод алгоритму антропоцентричного оператора мутації AWM

4.4. Механізм адаптивного навчання SRA

Після виконання оператора AWM механізм SRA (*Satisfaction Regression Adaptation*) коригує вагові коефіцієнти після завершення кожного семестру на основі агрегованих оцінок задоволеності студентів і викладачів. Адаптивне коригування параметрів через зворотний зв'язок розглядалося в контексті застосування нечіткої логіки в освітніх системах дистанційного навчання [6, 7]. Оцінки збираються

за шкалами $Q_{tech}, Q_{circ}, Q_{psych}, Q_{cogn} \in [5, 15]$. OLS-регресія

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Q$$

виявляє вагу кожного компонента в задоволеності учасників навчального процесу, після чого вагові коефіцієнти оновлюються з ЕМА-згладжуванням ($\alpha=0.4$) та обмеженням $w_j \geq 0.05$ [5]. Алгоритм механізму адаптивного навчання SRA наведено на рис. 4.

```

ALGORITHM SRA(w_old, F_components, Q_survey, alpha=0.4)
INPUT:  w_old - поточні ваги (w1..w4)
        F_components - вектори (F_tech, F_circ, F_psych, F_cogn) для N учасників
        Q_survey - матриця оцінок [N x 4]
        alpha - EMA learning rate
OUTPUT: w_new - оновлені ваги
FOR i <- 1 TO N DO
    Q_bar[i] <- mean(Q_survey[i, .])
END FOR
X <- [1 | F_components] // матриця ознак [N x 5]
b_hat <- OLS(X, Q_bar) // b_hat = (X'X)^{-1} X' Q_bar
b1..b4 <- b_hat[1..4]
b_pos <- max(b_hat_j, 0) for j=1..4
IF sum(b_pos) > 0 THEN
    w_hat <- b_pos / sum(b_pos)
ELSE
    w_hat <- w_old
END IF
FOR j <- 1 TO 4 DO
    w_new[j] <- alpha * w_hat[j] + (1-alpha) * w_old[j]
    w_new[j] <- max(w_new[j], 0.05)
END FOR
w_new <- w_new / sum(w_new)
RETURN w_new
  
```

Рис. 4. Псевдокод алгоритму механізму адаптивного навчання SRA

4.5. Повна схема алгоритму АМД

Метод АМД об'єднує всі три компоненти. Зовнішній цикл (між семестрами) оновлює вагові коефіцієнти через SRA; внутрішній цикл (всередині семестру) виконує еволюційну оптимізацію з операторами CPC і AWM. Повна схема антропоцентричного методу диспетчеризації показана на рис. 5.

Параметри алгоритму: $|P| = 200$, $p_{cross} = 0.85$, $p_{mut} = 0.15$, $k_t = 5$, $\beta = 2.0$, максимум 500 поколінь, критерій стагнації: 50 поколінь з $\Delta F < 0.001$, $\alpha = 0.4$ (SRA learning rate), мінімальна вага $w_j \geq 0.05$. Вибір цих значень обґрунтовано в підрозд. 5.3.

```

ALGORITHM AMD(plan, chronotypes, K_semesters)
INPUT: plan навчальний план і доручення
      chronotypes хронотипові профілі учасників
      K_semesters кількість семестрів
OUTPUT: x* оптимальний розклад, w* адаптовані ваги
w <- (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)
P <- Init-Population(|P|=200, plan, chronotypes)
FOR k <- 1 TO K_semesters DO
  gen <- 0; best_F <- 0; stagnation <- 0
  WHILE gen < 500 AND stagnation < 50 DO
    gen <- gen + 1
    parents <- tournament_select(P, k_t=5, |P|/2)
    offspring <- empty
    FOR EACH (x_A, x_B) IN parents DO
      IF random() < 0.85 THEN
        x_C, x_D <- CPC(x_A, x_B, w, chronotypes)
      ELSE
        x_C, x_D <- x_A, x_B
      END IF
      offspring <- offspring + {x_C, x_D}
    END FOR
    FOR EACH x IN offspring DO
      IF random() < 0.15 THEN x <- AWM(x, w, beta=2.0) END IF
    END FOR
    all <- P + offspring
    F_vals <- {F(x,w) : x IN all}
    P <- top_k(all, F_vals, k=|P|)
    curr_best <- max(F_vals)
    IF |curr_best - best_F| < 0.001 THEN
      stagnation <- stagnation + 1
    ELSE
      stagnation <- 0; best_F <- curr_best
    END IF
  END WHILE
  x*_k <- argmax F(x,w) over P
  Q_survey <- collect_satisfaction(x*_k)
  F_comp <- compute_components(x*_k)
  w <- SRA(w, F_comp, Q_survey, alpha=0.4)
  P <- Init-Population(|P|=200, plan_{k+1}, chronotypes)
END FOR
RETURN x*_{K_semesters}, w

```

Рис. 5. Повна схема антропоцентричного методу диспетчеризації

5. Експериментальна перевірка ефективності для задачі диспетчеризації занять у ЗВО

Для практичного оцінювання ефективності алгоритму проведено експеримент, який має такі вхідні показники: 400 студентів, 18 академічних груп, 60 викладачів, 42 дисципліни. Створено матрицю когнітивної сумісності S та хронотипові

профілі, зафіксовані відповідно до [5]. Кожну конфігурацію запущено 30 разів для статистичної надійності тесту.

5.1. Порівнювані конфігурації

Конфігурації для порівняльного аналізу перевірки ефективності для задачі диспетчеризації занять у ЗВО наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Конфігурації для порівняльного аналізу

Конфігурація	Кросовер	Мутація	Ваги / адаптація
Baseline GA	Двоточковий	Рівномірна swap	Рівномірні, фіксовані
CPC-GA	CPC	Рівномірна swap	Рівномірні, фіксовані
AWM-GA	Двоточковий	AWM ($\beta=2.0$)	Рівномірні, фіксовані
АМД (повний)	CPC	AWM ($\beta=2.0$)	Рівномірні \rightarrow SRA (три цикли)

5.2. Результати збіжності

Отримані значення показників збіжності у результаті 30 тестових запусків кожної з порівнюваних конфігурацій подано у табл. 5.

Експериментальна перевірка ефективності АМД продемонструвала, що застосування цього методу дало змогу скоротити час досягнення $F(x) > 0.75$ на 34.0% (тобто 38.4 проти 58.2 хв). Абляційний аналіз засвідчує, що CPC робить більший внесок

(приріст на 7.0% F за умови 500 поколінь), ніж АWM (у разі якого фіксувалося збільшення на 4.2%). Однак їх комбінація дає синергетичний ефект (зі зростанням на 18.3%). У наборі даних результату дисперсія $\sigma=0.029$ у АМД проти $\sigma=0.043$ у *Baseline* вказує на підвищену стабільність, оскільки антропоцентрично орієнтовані оператори звужують область ефективного пошуку значення функції [1, 4].

Таблиця 5. Показники збіжності (середнє $\pm \sigma$ по 30 запусках)

Конфігурація	F за умови 100 пок.	F за умови 500 пок.	t(F > 0.65), хв	t(F > 0.75), хв	σ фін.
Baseline GA	0.53 \pm 0.04	0.71 \pm 0.04	21.4 \pm 2.1	58.2 \pm 4.8	0.043
CPC-GA	0.59 \pm 0.04	0.76 \pm 0.04	15.7 \pm 1.8	41.3 \pm 4.1	0.037
AWM-GA	0.57 \pm 0.04	0.74 \pm 0.04	17.2 \pm 1.9	45.6 \pm 4.3	0.039
АМД	0.64 \pm 0.03	0.84 \pm 0.03	14.1 \pm 1.6	38.4 \pm 3.7	0.029

5.3. Вибір гіперпараметрів

Гіперпараметр мутації β відіграє вагоме значення в балансуванні результату методу АМД. Чутливість до β під час експерименту перевірялася в діапазоні $\beta \in \{0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0\}$. Значення $\beta=2.0$ забезпечує оптимальний баланс, оскільки за умови $\beta=0.5$ АWM еквівалентний рівномірній мутації ($F=0.72$), натомість, якщо $\beta=5.0$, виникає надмірна спрямованість ($F=0.77$, $\sigma=0.052$). Значення $\beta=2.0$ дає $F=0.84$ з $\sigma=0.029$. На відміну від непараметризованих підходів [14, 16], фіксований набір гіперпараметрів забезпечує відтворюваність експерименту й полегшує порівняння конфігурацій.

Параметр α SRA перевірявся в діапазоні $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$. У разі значення параметра $\alpha=0.2$ система занадто повільно реагує на зміни пріоритетів. За умови задання $\alpha=0.8$ ваги нестабільно коливаються внаслідок шуму в опитуванні ($\sigma_w > 0.04$ між циклами). Посереднє значення $\alpha=0.4$ забезпечує стійку збіжність до w^* за три цикли, якщо $\sigma_{noise} \leq 0.3$.

Це робить результат експерименту більш точним, порівняно з іншими значеннями цих параметрів.

5.4. Динаміка адаптації ваг через SRA

Динаміка адаптації вагових коефіцієнтів у процесі балансування результату антропоцентричного методу диспетчеризації відображена у таблиці 6.

За умови різних значень параметрів у процесі експерименту норма адаптації вагових коефіцієнтів $\|w-w^*\|_2$ скорочується з 0.152 до 0.011 (зі зменшенням на 92.8%), тоді як кореляція між w і w^* зростає з 0.61 до 0.89. Домінантним напрямом процесу адаптації є підвищення w_3 (*psych*) і w_2 (*circ*) внаслідок зниження w_1 (*tech*), коли учасники процесу стабільно оцінюють психологічний комфорт і хронотипову відповідність як більш значущі, ніж формальну відсутність конфліктів. Це повністю узгоджується з інформацією про вплив часу проведення занять на успішність здобувачів освіти, що належать до певного хронотипу [4, 7].

Таблиця 6. Динаміка адаптації вагових коефіцієнтів (еталон $w^* = (0.15; 0.30; 0.35; 0.20)$)

Цикл SRA	w_1 (tech)	w_2 (circ)	w_3 (psych)	w_4 (cogn)	$\ w-w^*\ _2$
Еталон w^*	0.150	0.300	0.350	0.200	—
w^0 (початок)	0.250	0.250	0.250	0.250	0.152
w^1 (1 семестр)	0.192	0.278	0.311	0.219	0.089
w^2 (2 семестр)	0.167	0.292	0.336	0.205	0.039
w^3 (3 семестр)	0.156	0.298	0.347	0.199	0.011

Обговорення результатів

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в трьох взаємопов'язаних аспектах. По-перше, перенесено антропоцентричні обмеження з рівня штрафних доданків цільової функції на рівень структури генетичних операторів через формальний опис інваріантів збереження циркадної узгодженості та когнітивної якості. По-друге, формалізовано метод адаптації вагових коефіцієнтів на основі регресійного аналізу зворотного зв'язку з гарантованою збіжністю за скінченну кількість циклів. По-третє, продемонстровано інваріантність підходу щодо типу виробничого об'єкта – від авіаційного машинобудування (ПФ "Спейс") до академічного середовища (АСУ ЗВО).

Ключова відмінність від підходів, запропонованих у працях [10, 11, 8], полягає в такому: у *Baseline GA* антропоцентрична властивість впливає лише на відбір через фітнес, але кросовер і мутація систематично порушують досягнутий рівень F_{circ} у процесі рекомбінації. CPC запобігає деградації, зберігаючи денну структуру як базову одиницю рекомбінації. Зв'язок між хронотиповою відповідністю розкладу й результативністю підтверджено емпіричними дослідженнями [1], що також узгоджується з підходом *constraint-preserving* до планування в задачах маршрутизації [13].

Обчислювальна вартість. CPC вимагає $O(|G| \cdot 6)$ додаткових обчислень на схрещування, AWM – $O(|G| \cdot 8 \cdot 6)$ обчислень $q(d, s, g)$. Загальне збільшення часу одного покоління: $11.8\% \pm 0.9\%$. Але, оскільки загальна кількість поколінь скорочується на $\sim 34\%$, підсумкова обчислювальна вартість для досягнення $F(x) > 0.75$ є меншою, ніж у *Baseline GA*.

Обмеження. SRA потребує щонайменше $N = 50$ учасників опитування для надійної OLS-регресії. Якщо $N < 50$, рекомендовано ридж-регресію. Лінійна модель SRA адекватна для поступової адаптації ваг, але може не відобразити нелінійні залежності через різкі зміни контингенту. У цьому разі доцільне примусове скидання ваг до рівномірних із подальшою повторною адаптацією.

Висновки

У роботі запропоновано антропоцентричний підхід до диспетчеризації бізнес-процесів за умови

функціонування виробничих об'єктів, що формалізує задачу розподілу завдань між виконавцями з огляду на їх хронобіологічні, когнітивні та психологічні якості. Підхід є інваріантним щодо типу об'єкта; він може бути використаний на прикладах авіаційного виробництва (ПФ "Спейс") й управління навчальним процесом у ЗВО.

Розроблений у процесі дослідження антропоцентричний метод диспетчеризації (АМД) оснований на перенесенні антропоцентричних обмежень із рівня штрафних доданків на рівень структури генетичних операторів. Під час виконання алгоритму хронотип-зберігальний оператор CPC обирає точки розрізу даних пропорційно різниці циркадної якості між батьківськими особинами. Тоді як оператор AWM реалізує *softmax*-зважений вибір часових слотів для мутації, концентруючи мутаційний бюджет на проблемних слотах із найнижчим антропоцентричним внеском. Отже, метод АМД значно підвищує ефективність процесу диспетчеризації, який може бути використаний як у виробничих процесах, так і в закладах вищої освіти.

Крім цього, необхідно зауважити, що в алгоритмі застосовується механізм адаптивного навчання *Satisfaction Regression Adaptation* (SRA). Він коригує вагові коефіцієнти цільової функції через OLS-регресію агрегованих оцінок задоволеності всіх учасників виробничого чи навчального процесу з ЕМА-згладжуванням ($\alpha = 0.4$) та обмеженням $w_j \geq 0.05$. Це усуває необхідність ручного налаштування параметрів і забезпечує автоматичне розгортання в складі автоматизованої системи управління.

Порівняльний аналіз результату експерименту з 30 незалежних запусків підтвердив, що АМД скорочує час досягнення $F(x) > 0.75$ на 34.0% (38.4 проти 58.2 хв). Також запропонований метод підвищує фінальне F до 0.84 (зі збільшенням на 18.3% щодо *Baseline GA*) і знижує дисперсію ($\sigma = 0.029$ проти 0.043). SRA за три цикли скорочує $\|w - w^*\|_2$ з 0.152 до 0.011 (зі зменшенням на 92.8%), підвищуючи кореляцію з 0.61 до 0.89.

Перспективними результатами дослідження є заміна лінійної регресії SRA на навчання з підкріпленням для нелінійних залежностей задоволеності та застосування CPC/AWM до задачі динамічного перепланування впродовж виробничого циклу. Це уможливує розроблення паралельної

острівної версії програмного забезпечення для великих виробничих систем із розподіленою АСУ.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що не має конфлікту інтересів щодо цього дослідження.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що під час написання цієї статті не було застосовано технологій штучного інтелекту.

Фінансування

Дослідження виконано без фінансової підтримки.

References

1. Maučec, K., Štukovnik, V. (2024), "The Relationship between Chronotype and Academic Achievement among Slovene University Students: The Mediating Role of Trait Self-Control and Sleep Quality", *Center for Educational Policy Studies Journal*. DOI: <https://doi.org/10.26529/cepsj.1790>
2. Jankowski, K. S., Díaz-Morales, J. F., Vollmer, C. (2023), "Chronotype, Time of Day, and Performance on Intelligence Tests in the School Setting", *Journal of Intelligence*, Vol. 11, No. 1, p. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/jintelligence11010013>
3. Al-Rfooh, O. F., Khater, W. (2023), "The impact of chronotype on physical health, psychological health, and job performance among health care providers in acute care settings", *International Journal of Healthcare Management*, Vol. 16, No. 4, pp. 581–589. DOI: <https://doi.org/10.1080/20479700.2023.2177665>
4. Souza, S. S., Brito, K. S., Duarte, L. L. (2024), "Sleep quality, chronotype and academic performance of university students in the health area", *Biological Rhythm Research*. DOI: <https://doi.org/10.1080/09291016.2024.2437643>
5. Sytnik, O. O. (2025), "Anthropocentric model of class scheduling in higher education institutions of aerospace profile", *Aerospace Technic and Technology*, No. 6 (215), pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.6.07>
6. Chen, S.-C., Chen, H.-M., Chen, H.-K., Li, C.-L. (2024), "Multi-Objective Optimization in Industry 5.0: Human-Centric AI Integration for Sustainable and Intelligent Manufacturing", *Processes*, Vol. 12, No. 12, p. 2723. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12122723>
7. Ситнік, О., Вдовітченко, О. (2025), "Математичні структури та інструменти антропоцентричної диспетчеризації в закладах вищої освіти", *Відкриті інформаційні та комп'ютерно-інтегровані технології*, № 105, С. 212–226. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.105.17>
8. Mokhtari, M., Vaziri Sarashk, M., Asadpour, M., Saeidi, N., Boyer, O. (2021), "Developing a Model for the University Course Timetabling Problem: A Case Study", *Complexity*, Article e9940866. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9940866>
9. Oude Vrielink, R. A., Jansen, E. A., Hans, E. W., van Hillegersberg, J. (2019), "Practices in timetabling in higher education institutions: a systematic review", *Annals of Operations Research*, Vol. 275, pp. 145–160. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2688-8>
10. Burke, E. K., Petrovic, S. (2002), "Recent research directions in automated timetabling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 140, No. 2, pp. 266–280. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00069-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00069-3)
11. Hăitan, O., Nazarov, O. (2020), "Hybrid approach to solving the automated timetabling problem in higher educational institution", *Системи Управління Навігації та Зв'язку*, Vol. 2, pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.060>
12. Косолап, А. І., Дубовик, Т. М. (2021), "Оптимізація розкладу занять в університеті", *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, № 3, С. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-3-15>
13. Weiszer, M., Burke, E. K., Chen, J. (2022), "Search graph structure and its implications for multi-graph constrained routing and scheduling problems", *Scientific Reports*, Vol. 12, Art. 14860. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18026-w>
14. Wang, S., Drake, J. H., Melder, D. et al. (2025), "A selection hyper-heuristic approach to the single airport slot allocation problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 184, Art. 107223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107223>
15. Mahlous, H. (2023), "Student timetabling genetic algorithm accounting for student preferences", *PeerJ Computer Science*, Vol. 9, Article e1200. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1200>
16. Eiben, A. E., Smith, J. E. (2015), Introduction to Evolutionary Computing, 2nd ed., Springer, Berlin, 302 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8>
17. Roenneberg, T., Wirz-Justice, A., Mrosovsky, M. (2003), "Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes", *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 18, No. 1, pp. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.1177/0748730402239679>
18. Horne, J. A., Ostberg, O. (1976), "A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms", *International Journal of Chronobiology*, Vol. 4, No. 2, pp. 97–110.

19. Феоктистова, О. І. (2017), Модель та методи компетентісно-орієнтованого експертного оцінювання команди виконавців високотехнологічного проекту: дисертація канд. техн. наук: 05.13.22, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харків, 215 с.
20. Носиков, О., Ситнік, О. (2025), "Формування єдиного інформаційного простору в закладах вищої освіти: виклики, рішення та перспективи розвитку", *Відкриті інформаційні та комп'ютерно-інтегровані технології*, № 104, С. 200–213. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.104.13>

Received (Надійшла) 27.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.03.2026

Publication date (Дата публікації) 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Ситнік Олег Олександрович – Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, Харків, Україна;

Oleh Sytnik – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: o.sytnik@khai.edu

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0009-4504-3489>

APPROACH TO BUSINESS PROCESS DISPATCHING IN THE OPERATION OF INDUSTRIAL FACILITIES BASED ON ANTHROPOCENTRICITY

The article presents an approach to anthropocentric dispatching of business processes in the operation of production facilities, aligning task distribution among executors by accounting for a combination of their chronobiological, cognitive, and psychological characteristics. The goal of this work is to improve the efficiency of business processes in the operation of production facilities (PF) through the development, formal description, and validation of the anthropocentric dispatching method (ADM) as a general approach to the class of scheduling problems in PFs with human executors, as well as to demonstrate its applicability using a real aviation industry enterprise and an automated control system for the educational process of a higher education institution (HEI). The objectives of this study are the formalization of the anthropocentric dispatching problem as one that is invariant with respect to the type of production facility, the development of the chronotype-preserving crossover operator CPC, and the implementation of the anthropocentric weight mutation operator AWM algorithm. The paper also examines the adaptive weight adjustment mechanism (SRA) and compares ADM with baseline GA configurations. The methodological tools employed are an evolutionary algorithm with anthropocentrically oriented genetic operators, OLS regression of satisfaction across all participants in the educational process, ablation analysis, and comparative testing over 30 independent runs of a software prototype. The practical results obtained show that ADM reduces the time to reach $F(x) > 0.75$ by 34.0% (38.4 vs. 58.2 min), increases the final value of the objective function to 0.84 (an 18.3% improvement over Baseline GA), and reduces result variance to $\sigma = 0.029$. The norm $\|w - w^*\|_2$ decreases by 92.8% over a period of 3 semesters. Conclusions: the scientific novelty of this study lies in the formal description of invariants that preserve circadian coherence and cognitive quality within the structure of the genetic operators, rather than through penalty terms in the objective function. The generality of the approach for a broad class of production dispatching problems with a human executor has also been demonstrated.

Keywords: anthropocentric dispatching; business process management; industrial facility AMS; evolutionary algorithm; genetic operators; chronotype-preserving crossover; adaptive learning; educational process management system.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ситнік О. О. Підхід до диспетчеризації бізнес-процесів в умовах функціонування виробничих об'єктів на основі антропоцентричності. *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*. 2026. № 2 (189). С. 247–258. DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2026.189.247>

Sytnik, O. (2026), "Approach to business process dispatching in the operation of industrial facilities based on anthropocentricity", *Management Information System and Devices*, No. 2 (189), P. 247–258. DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2026.189.247>