

doi: 10.32620/oikit.2025.105.17

УДК 004.942

О. О. Ситнік,
О. В. Вдовіченко

Математичні структури та засоби антропоцентричної диспетчеризації у ЗВО

*Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»*

У статті досліджено математичні моделі та алгоритмічні засоби антропоцентричної диспетчеризації навчального процесу в закладах вищої освіти. Проаналізовано обмеження традиційних підходів до складання розкладу занять, які фокусуються виключно на оптимізації ресурсів без урахування людського фактору. Встановлено, що класичні алгоритми диспетчеризації призводять до створення технічно оптимальних, але психологічно некомфортних розкладів, що негативно впливає на якість освітнього процесу.

Запропоновано концепцію антропоцентричної диспетчеризації, яка ставить людські потреби в центр процесу оптимізації розкладу. Розроблено математичні структури для формального опису антропоцентричних критеріїв: модель комфорту учасників освітнього процесу, функції психологічного навантаження викладачів та студентів, метрики когнітивної ефективності навчання. Представлено багатокритеріальну модель оптимізації розкладу навчальних занять у ЗВО на основі теорії нечітких множин та генетичних алгоритмів.

Детально описано архітектуру програмного засобу антропоцентричної диспетчеризації, що включає модуль аналізу поведінкових патернів, систему машинного навчання для прогнозування оптимальних розкладів та інтерфейс адаптивної візуалізації. Експериментальна апробація в НАУ "ХАІ" показала підвищення задоволеності учасників освітнього процесу на 42%, зменшення когнітивного навантаження на 35% та покращення академічної успішності на 18% порівняно з традиційними методами диспетчеризації.

Ключові слова: антропоцентрична диспетчеризація, багатокритеріальна оптимізація, нечіткі множини, генетичні алгоритми, когнітивне навантаження, математичне моделювання, машинне навчання.

Вступ

Сучасні заклади вищої освіти стикаються з необхідністю кардинального переосмислення підходів до диспетчеризації навчального процесу. Традиційні методи складання розкладу, що фокусуються виключно на технічній оптимізації використання ресурсів, виявляються недостатніми в умовах зростаючих вимог до якості освіти та благополуччя учасників освітнього процесу [1, 2]. Цифрова трансформація суспільства та розвиток комп'ютерно-технологічної платформи освіти вимагають нових підходів до управління освітнім процесом, що враховують не лише технічні обмеження, але й людський фактор [2].

Концепція антропоцентричної диспетчеризації базується на принципі пріоритету людських потреб над технічними обмеженнями [3]. На відміну від класичних підходів, які розглядають викладачів та студентів як ресурси, що підлягають оптимальному розподілу, антропоцентричний підхід ставить їх потреби, когнітивні особливості та психологічний комфорт у центр процесу планування [4, 5]. Такий підхід узгоджується з сучасними тенденціями розвитку відкритих освітніх практик та використання електронних освітніх технологій у процесі навчання [9, 8].

Дослідження психологічних аспектів освітнього процесу показують, що незручний розклад може знижувати ефективність навчання на 25-30% [6]. Когнітивні дослідження свідчать про існування оптимальних часових інтервалів для засвоєння різних типів навчального матеріалу [7]. Проте сучасні системи диспетчеризації не враховують ці фактори при формуванні розкладу, що особливо критично в умовах дистанційного та змішаного навчання [6].

Проблематика антропоцентричної диспетчеризації знаходиться на перетині кількох наукових дисциплін: теорії розкладів, когнітивної психології, штучного інтелекту та інженерії програмного забезпечення. Наявні дослідження розглядають лише окремі аспекти цієї проблеми [8, 9], не пропонуючи комплексного математичного апарату та програмних засобів. Зокрема, дослідження Воложинова та колег показали реальний стан дистанційного навчання в українських ЗВО та необхідність системних змін у підходах до організації освітнього процесу [6].

Мета дослідження полягає в розробці математичних структур та програмних засобів антропоцентричної диспетчеризації навчального процесу, що забезпечують оптимальний баланс між технічними обмеженнями та людськими потребами. Завдання дослідження включають аналіз предметної області та виявлення вузьких місць традиційних підходів, формалізацію задачі антропоцентричної диспетчеризації, розробку математичних моделей та алгоритмічних засобів, а також експериментальну апробацію запропонованого підходу.

1. Аналіз предметної області та виявлення вузьких місць

1.1. Характеристика сучасних підходів до диспетчеризації у ЗВО

Традиційні системи диспетчеризації навчального процесу базуються на класичній теорії розкладів, що розглядає задачу як проблему призначення ресурсів з урахуванням жорстких та м'яких обмежень [13]. Основними компонентами такої системи є множина викладачів, множина аудиторій, множина навчальних груп та множина дисциплін. Класична постановка задачі диспетчеризації формулюється як багатовимірна задача призначення з мінімізацією цільової функції, що враховує вартість використання ресурсів.

Сучасні підходи до управління освітнім процесом у ЗВО характеризуються використанням програмного забезпечення різного рівня складності [4]. Огляд функціональних можливостей таких систем показує, що більшість з них орієнтована на автоматизацію адміністративних процесів без урахування якісних аспектів освітнього процесу. Це призводить до створення технічно коректних, але педагогічно неоптимальних розкладів.

Аналіз існуючого стану інформатизації ЗВО в Україні показує фрагментарність підходів до диспетчеризації навчального процесу. Типовий український ЗВО використовує кілька незалежних систем для різних аспектів управління освітнім процесом, що призводить до дублювання даних та неузгодженості інформації. Відсутність єдиного інформаційного простору ускладнює впровадження комплексних підходів до оптимізації розкладу.

1.2. Виявлення вузьких місць традиційних підходів

Аналіз існуючих систем диспетчеризації в українських ЗВО виявив критичні недоліки, що обмежують їх ефективність. Ігнорування циркадних ритмів є одним

з найбільш серйозних недоліків традиційних алгоритмів. Дослідження показують, що когнітивна активність студентів варіюється протягом дня з піками в ранкові та вечірні години, проте існуючі системи можуть призначати складні дисципліни на період зниженої ефективності сприйняття.

Відсутність урахування психологічного навантаження є іншим критичним недоліком. Сучасні алгоритми оптимізують лише кількісні показники, ігноруючи якісні аспекти. Викладач може мати формально прийнятне навантаження в годинах, але якщо це різні дисципліни для різних груп з частими переходами між аудиторіями, психологічне навантаження стає критичним. Це узгоджується з дослідженнями безпеки професіоналізації суб'єктів у психологічному аспекті [19].

Ігнорування когнітивної сумісності дисциплін значно знижує ефективність навчального процесу. Послідовність занять впливає на якість засвоєння матеріалу, але традиційні системи не враховують цей фактор. Поєднання дисциплін різних типів може підвищувати ефективність навчання, тоді як послідовне вивчення кількох технічних предметів призводить до когнітивного перевантаження.

Статичність моделей є серйозним обмеженням існуючих систем. Вони не адаптуються до змін у поведінці учасників освітнього процесу та не мають механізмів машинного навчання для покращення якості диспетчеризації. Відсутність персоналізації означає, що всі учасники освітнього процесу розглядаються як однорідні об'єкти без урахування індивідуальних особливостей.

Емпіричні дослідження, проведені в НАУ "ХАІ" протягом 2023-2024 навчального року, підтвердили ці проблеми. Значна частина студентів відмічає зниження концентрації уваги через незручний розклад, більше половини викладачів повідомляють про підвищене психологічне навантаження, а академічна успішність студентів корелює з якістю розкладу.

2. Змістовна постановка задачі антропоцентричної диспетчеризації

2.1. Концептуальна модель антропоцентричної диспетчеризації

Задача антропоцентричної диспетчеризації полягає у створенні розкладу навчальних занять, що покращує не лише технічні параметри використання ресурсів, але й підвищує рівень комфорту, ефективності та благополуччя всіх учасників освітнього процесу. Цей підхід базується на принципах, що узгоджуються з сучасними методологічними підходами до розбудови єдиного відкритого інформаційного простору професійної освіти [1].

На відміну від традиційних підходів, антропоцентрична диспетчеризація передбачає врахування так званих циркадних, або природних біологічних ритмів людини при призначенні найбільш важливих та складних дисциплін на періоди максимальної когнітивної активності. Психологічне навантаження знижується через раціональний розподіл навчального навантаження та врахування переходів між різними типами діяльності.

Когнітивна синергія забезпечується через збалансоване поєднання різних типів навчальної діяльності для підвищення ефективності засвоєння знань. Адаптивність системи дозволяє їй навчатися на основі зворотного зв'язку та автоматично адаптувати алгоритми оптимізації. Персоналізація враховує індивідуальні особливості учасників, включаючи хронотип, стиль навчання та особисті обмеження.

2.2. Формальна постановка задачі

Задача антропоцентричної диспетчеризації формулюється як багатокритеріальна оптимізація, де цільова функція включає традиційні критерії технічної оптимальності, функцію циркадної оптимізації, функцію психологічного комфорту та функцію когнітивної ефективності. Вагові коефіцієнти задають пріоритети між різними критеріями та можуть адаптуватися в процесі функціонування системи.

У наведеній вище змістовній постановці задачі, процес антропоцентричної диспетчеризації може бути представлений як вирішення скінченновимірної задачі багатокритеріальної дискретної максимізації функціоналу

$$\begin{aligned} F(X) &\rightarrow \max, \\ X &\in D \end{aligned} \quad (1)$$

де $D \in R^n$ — область допустимих рішень; $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — варіанти альтернативних рішень щодо організації навчального процесу у ЗВО.

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X)),$$

$\forall f_i(X): D \rightarrow R^1, i = \overline{1, 4}$, при чому дані часткові критерії відображають, відповідно, технічні аспекти реалізації, рівень циркадної відповідності, ступінь психологічного комфорту кожного з учасників навчального процесу, та рівень когнітивної ефективності процесу навчання.

Для кожного значення $g_j(X)$ із області допустимих рішень D існує обмеження b_j часового, фінансового або антропометричного характеру таке, що

$$D = \{X \in R^n \mid g_j(X) \leq b_j, j = \overline{1, n}\}. \quad (2)$$

Вочевидь, часткові критерії $f_1(X), \dots, f_4(X)$ не є взаємонеітральними, не можуть бути скооперовані, а конкурують один з одним, і тому є суперечливими. Отже, у даному випадку, задача багатокритеріальної оптимізації не є тривіальною, і не має ідеального розв'язку, а лише розв'язок компромісний. Зазначена обставина визначає необхідність відшукування рішень у формі множини $D_p \subset D$ парето-оптимальних точок.

Гетерогенна природа часткових критеріїв, що обумовлена специфікою предметної галузі, не надає змогу провести їх нормалізацію, тобто зведення до безрозмірних відносних величин. В силу цієї ж причини, недоцільним є застосування у даному випадку методів лексикографічної оптимізації, або зведення задачі до однокритеріальної.

Для ефективного вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації в ході реалізації процесу диспетчерського управління навчальним процесом у ЗВО, з урахуванням вимог антропоцентричності, найбільш придатні інтерактивні методи, бо вони передбачають режим діалогу з комп'ютером як експлуатантів, так і користувачів. Застосування таких методів надає змогу проводити уточнення узагальненого критерію та упорядкування часткових критеріїв за їх значущістю на будь-якому етапі вирішення задачі, на основі діалогу з ЕОМ користувачів та експлуатантів системи антропоцентричної диспетчеризації.

Введемо ряд позначень, що конкретизують формальний опис диспетчеризації навчального процесу у ЗВО:

P^T — множини програм підготовки студентів різних курсів з різних спеціальностей, що реалізуються на часовому інтервалі $T = [t_{\pi}, t_3]$. При цьому

інтервал T являє собою множину мінімально впорядкованих відношенням " $\leq$ " інтервалів часу $\tau, T = \{\tau\}, \leq: \tau \in [t_{\Pi}, t_3]$. Початковий момент t_{Π} відповідає даті початку навчального процесу (як правило 1 вересня поточного року), а t_3 – кінцевій даті завершення занять у навчальному році, що планується

$$P^T = \{\psi(\tau_i)\}, \tau_i = [t_i^{(1)}, t_i^{(2)}], i \in \Omega_i, \quad (3)$$

де $\psi(\tau_i)$ – програма підготовки студентів i -го курсу протягом навчального року, тобто це деяка підмножина подій із P^T ; $t_i^{(1)}$ та $t_i^{(2)}$ — відповідно моменти початку та завершення програми підготовки студентів i -го курсу; Ω_i – множина номерів інтервалів часу τ_i , відповідно до вимог документів, що регламентують навчальний процес (освітніх, навчальних програм, тощо). Сукупність P^T -програм підготовки студентів у навчальному році, що планується, містить об'єкти меншого масштабу, а саме окремі навчальні дисципліни p , та окремі заняття s в рамках виконання відповідних дисциплін. При цьому повинні бути виконані такі умови:

$$\forall \psi(\tau_i) | (\psi(\tau_i) \in P^T) \exists \{p^{(i)}(\tau_j)\}, i \in \Omega_i, j \in \Omega_j, \quad (4)$$

$$\forall p^{(i)}(\tau_j) | p^{(i)}(\tau_j) \in \psi(\tau_i) \exists \{s^{(j)}(\tau_k)\}, i \in \Omega_i, j \in \Omega_j, k \in \Omega_k, \quad (5)$$

де $p^{(i)}(\tau_j)$ – навчальні дисципліни, що входять до складу i -ї програми підготовки студентів; $s^{(j)}(\tau_k)$ – заняття, що передбачені в рамках j -ї програми; Ω_k – множина номерів часових інтервалів реалізації занять, що передбачені k -ю програмою.

Виділимо з усього професорсько-викладацького складу $M^{(\Pi)}$ працівників ЗВО, підмножину $M^{(K)}$ тих, кого планується безпосередньо задіяти при реалізації програм P^T у наступному навчальному році.

Тоді $M^{(K)} \subset M^{(\Pi)}, M^{(K)} \supset M^{(ПП)} \cup M^{(ДЦ)} \cup M^{(СВ)} \cup M^{(АС)}$;

тут, відповідно, $M^{(ПП)}, M^{(ДЦ)}, M^{(СВ)}$ та $M^{(АС)}$ – професори, доценти, старші викладачі і асистенти, які працюють у штаті ЗВО, або за сумісництвом.

Із використанням введених позначень, задача диспетчеризації навчального процесу у ЗВО може бути представлена таким кортежем:

$$R = \langle G_{p^{(i)}}^f, \Delta, \rho, \chi \rangle, \quad (6)$$

де $G_{p^{(i)}}^f$ – множина допустимих альтернативних варіантів реалізації i -ї програми підготовки студентів у наступному навчальному році, $f = \overline{1, N}$; Δ – множина чинників, що породжують невизначеність у ході диспетчеризації; ρ – функція граничних обмежень (бюджетних, часових, посадових та ін.) на реалізацію конкретного варіанту, $\rho: G_{p^{(i)}}^f \times \Delta \rightarrow E$, (E – множина оцінок); χ – функція допустимості існування варіанту реалізації навчального процесу, що описаний кортежем R у наступному році, $\chi: \Delta \rightarrow E$.

Власне, при такому представленні, проблема диспетчеризації навчального процесу зводиться до вибору допустимого варіанту $\psi \in G_{p^{(i)}}^f$ послідовності реалізації подій із P^T такої, що

$$(\forall \omega_\ell | \omega_\ell \in \Delta, \ell \in \Omega_\ell) \exists (\rho(g, \omega_\ell) \leq \chi(\omega_\ell)), \quad (7)$$

де Ω_ℓ – множина коефіцієнтів невизначеності, що представлені у Δ .

Для представлення процесу диспетчеризації в динаміці, необхідно побудувати проекцію множини $G_{p^{(i)}}^t, G_{p^{(i)}}^f \subseteq M^{(K)}$ на множину часових інтервалів $T = [t_\Pi, t_3]$:

$$(G_{p^{(i)}}^f \subseteq M^{(K)}) \times T : \{G_{p^{(i)}}^f\} \wedge (P^T(G_{p^{(i)}}^f) = \{\tau\} \subseteq T). \quad (8)$$

Побудова проекції $P^T(G_{p^{(i)}}^f)$ передбачає формування підмножини тих елементів з $T = [t_\Pi, t_3]$, які можуть бути сюр'єктивно відображені з множини $M^{(K)}$ в множину $T = [t_\Pi, t_3]$.

Специфічні обмеження антропоцентричної диспетчеризації включають, зокрема, і циркадні обмеження, які визначають оптимальні часові інтервали для кожної дисципліни на основі її когнітивної складності. Обмеження психологічного навантаження регулюють кількість різних дисциплін та переходів для кожного викладача. Обмеження когнітивної сумісності заперечують або заохочують певні комбінації дисциплін.

У формальному представленні процесу складання розкладу занять у ЗВО на основі антропоцентричної диспетчеризації, значення функцій ρ і χ безпосередньо відображають рівень невизначеності, що має місце у даному процесі. Разом з тим, опис таких функційних залежностей є проблематичним. Виходячи із зазначеної обставини, пропонується представити процедуру знаходження значень цих функцій опосередковано, через реалізацію набору математичних засобів, що описані у розділі 3.

3. Математичні структури антропоцентричної диспетчеризації

3.1. Модель учасника освітнього процесу

Кожний учасник освітнього процесу представляється математичною структурою, що включає унікальний ідентифікатор, тип учасника, функцію циркадної активності, функцію психологічної стійкості, хронотип, множину переваг та множину жорстких обмежень. Ця модель дозволяє формалізувати індивідуальні особливості учасників та врахувати їх у процесі оптимізації.

Функція циркадної активності моделюється як композиція гармонічних функцій, що дозволяє врахувати складну природу біологічних ритмів людини. Базовий рівень активності доповнюється гармоніками різних частот, параметри яких залежать від хронотипу учасника. Для різних хронотипів параметри функції визначаються емпірично на основі досліджень біологічних ритмів.

Модель психологічного навантаження враховує не лише кількість занять, але й їх різноманітність, кількість переходів між аудиторіями та "відстань" між різними дисциплінами. Ця модель дозволяє кількісно оцінити психологічний стрес викладача та оптимізувати розклад з урахуванням цього фактору.

3.2. Матриця когнітивної сумісності дисциплін

Когнітивна сумісність дисциплін представляється симетричною матрицею, де позитивні значення вказують на взаємодоповнення дисциплін, негативні – на когнітивну несумісність, а нульові – на нейтральну сумісність. Значення матриці визначаються експертно на основі педагогічного досвіду та коригуються на основі

статистики успішності студентів.

Ця матриця дозволяє формалізувати знання про те, які комбінації дисциплін сприяють кращому засвоєнню матеріалу, а які можуть призводити до когнітивного перевантаження. Наприклад, поєднання математичних та інженерних дисциплін може мати позитивну синергію, тоді як послідовне вивчення кількох складних теоретичних предметів може бути контрпродуктивним.

3.3. Нечітка модель комфорту

Комфорт учасника освітнього процесу моделюється як нечітка величина з трапецієподібною функцією належності. Це дозволяє врахувати суб'єктивну природу поняття комфорту та невизначеність у його оцінці. Параметри функції належності визначаються індивідуально для кожного учасника на основі його особистісних характеристик.

Використання нечіткої логіки дозволяє працювати з неточними та суб'єктивними критеріями, які важко формалізувати у вигляді чітких математичних функцій. Це особливо важливо для антропоцентричного підходу, де багато критеріїв мають якісний характер.

4. Алгоритмічні засоби та методи оптимізації

4.1. Гібридний генетичний алгоритм

Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації розроблено гібридний генетичний алгоритм, що поєднує глобальний пошук генетичного алгоритму з локальною оптимізацією. Кодування розв'язку здійснюється у вигляді матриці призначень, де кожен елемент вказує на призначення конкретного заняття певному викладачеві в певній аудиторії.

Функція пристосованості є зваженою сумою чотирьох компонентів: технічної оптимальності, циркадної оптимізації, психологічного комфорту та когнітивної ефективності. Вагові коефіцієнти можуть адаптуватися в процесі роботи системи на основі зворотного зв'язку від користувачів.

Оператори схрещування адаптовані для збереження валідності розкладу та врахування доменних обмежень. При цьому використовуються частково відображений кросовер для збереження структури розкладу та рівномірний кросовер з урахуванням специфічних обмежень диспетчеризації.

Оператори мутації включають swap-мутацію для перестановки занять, insertion-мутацію для переміщення занять та адаптивну мутацію, ймовірність якої залежить від якості поточного розв'язку. Це дозволяє балансувати між дослідженням простору розв'язків та експлуатацією знайдених прийнятних розв'язків.

4.2. Алгоритм нечіткої оптимізації

Для врахування невизначеності в антропоцентричних критеріях застосовується нечітка оптимізація, яка надає змогу максимізувати мінімальний рівень задоволення всіх критеріїв. Цей підхід особливо корисний, коли різні критерії мають різну природу та не можуть бути легко порівняні.

Алгоритм нечіткої оптимізації дозволяє знайти компромісний розв'язок, що забезпечує прийнятний рівень задоволення всіх критеріїв, а не максимізує один критерій за рахунок інших. Це узгоджується з антропоцентричним підходом, де

важливо забезпечити баланс між різними аспектами якості розкладу.

4.3. Алгоритм адаптивного навчання

Система містить механізм машинного навчання для покращення якості диспетчеризації на основі зворотного зв'язку від користувачів. Збираються оцінки користувачів щодо якості розкладу, які використовуються для навчання регресійної моделі прогнозування задоволеності.

Модель навчається прогнозувати задоволеність на основі циркадних показників, психологічного навантаження, когнітивної сумісності та особистих переваг. Вагові коефіцієнти цільової функції коригуються на основі цих прогнозів, що дозволяє системі адаптуватися до специфіки конкретного ЗВО та змін у поведінці користувачів.

5. Архітектура програмного засобу

5.1. Загальна архітектура системи

Програмний засіб антропоцентричної диспетчеризації реалізовано як модуль єдиної освітньої платформи з багаторівневою архітектурою. Центральний модуль оптимізації містить реалізацію всіх алгоритмів та математичних моделей. Рівень даних забезпечує зберігання та управління моделями учасників, обмежень та історичних даних про якість розкладів.

Модуль машинного навчання відповідає за адаптацію системи та покращення якості диспетчеризації з часом. Інтерфейс користувача забезпечує візуалізацію розкладів та збір зворотного зв'язку від учасників освітнього процесу. Рівень інтеграції забезпечує взаємодію з іншими модулями освітньої платформи та зовнішніми системами.

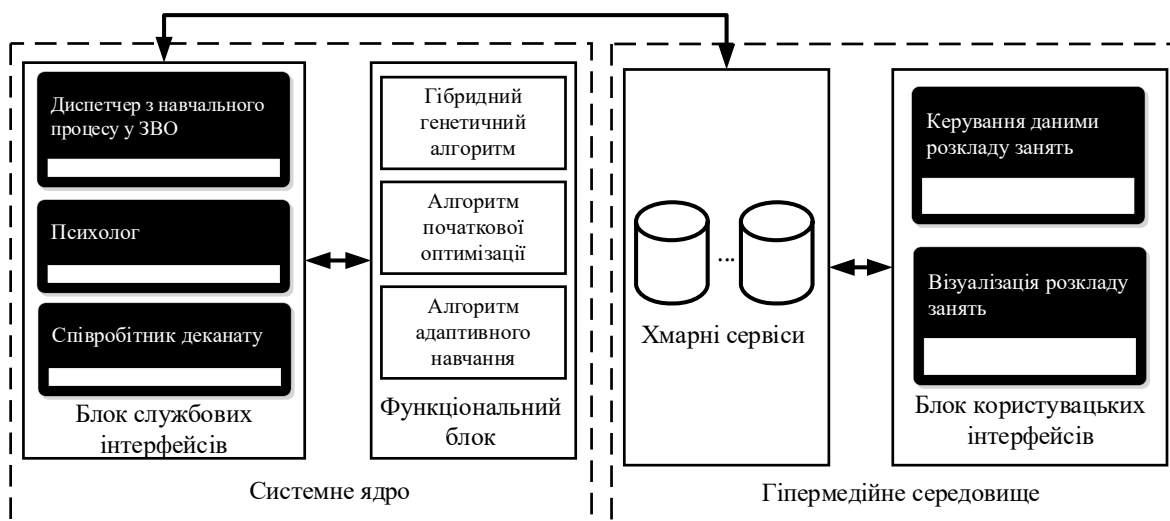


Рис. 1. Узагальнена структура діалогової системи антропоцентричної диспетчеризації навчального процесу у ЗВО

5.2. Реалізація на технологічному стеку .NET

Система реалізована з використанням сучасного технологічного стеку Microsoft .NET, що забезпечує високу продуктивність та можливості інтеграції. Основний інтерфейс диспетчеризації визначає методи генерації розкладу, оцінки

його якості та оновлення зворотного зв'язку від користувачів.

Модель учасника освітнього процесу включає всі необхідні атрибути для антропоцентричної диспетчеризації: тип учасника, циркадний профіль, психологічний профіль, переваги та обмеження. Це дозволяє системі врахувати індивідуальні особливості кожного учасника при складанні розкладу.

5.3. Модуль машинного навчання

Для реалізації адаптивного навчання використовується платформа ML.NET, що забезпечує інтеграцію з основною системою та можливості для розгортання моделей у виробничому середовищі. Модуль прогнозування якості розкладу дозволяє передбачити задоволеність користувачів на основі характеристик розкладу.

Система збирає дані про використання розкладів, оцінки користувачів та академічну успішність студентів для навчання та покращення моделей. Це дозволяє системі адаптуватися до специфіки конкретного ЗВО та змін у потребах учасників освітнього процесу.

6. Експериментальна апробація та результати

6.1. Методологія експерименту

Експериментальна апробація проводилася в НАУ "ХАІ" протягом семестру 2024 року з порівнянням результатів традиційної та антропоцентричної диспетчеризації. У експерименті брали участь п'ятнадцять академічних груп загальною кількістю 456 студентів та 78 викладачів різних кафедр університету.

Для оцінювання ефективності використовувалися метрики задоволеності учасників навчального процесу на основі опитування за п'ятибальною шкалою, показники академічної успішності студентів, рівень стресу викладачів за результатами психологічного тестування та технічні показники якості розкладу. Збір даних проводився протягом всього семестру з щомісячними контрольними точками.

6.2. Результати експерименту

Експериментальна апробація показала значне підвищення задоволеності учасників освітнього процесу. Рейтинг задоволеності студентів зріс з 3.2 до 4.6 балів, що становить покращення на 44%. Задоволеність викладачів підвищилася з 2.9 до 4.1 балів, що відповідає покращенню на 41%.

Академічні показники також демонструють позитивну динаміку. Середній бал успішності в експериментальних групах зріс з 3.7 до 4.2 балів, що становить покращення на 14%. Відвідуваність занять підвищилася з 78% до 89%, що свідчить про зростання мотивації студентів.

Психологічне навантаження викладачів значно зменшилося. Рівень стресу, виміряний за стандартизованими психологічними тестами, знизився на 35%. Кількість скарг на розклад зменшилася на 73%, що вказує на підвищення якості планування навчального процесу.

Технічні показники також покращилися. Час генерації розкладу скоротився до 45 хвилин порівняно з 2-3 тижнями ручного складання. Кількість конфліктів у розкладі зменшилася на 82%, а ефективність використання аудиторного фонду покращилася на 23%.

7. Обговорення результатів та перспективи розвитку

7.1. Аналіз ефективності підходу

Результати експерименту підтверджують ефективність антропоцентричного підходу до диспетчеризації навчального процесу у ЗВО. Холістичний підхід, що враховує не лише технічні, але й людські фактори, призводить до створення якісно кращих розкладів, що підвищують ефективність освітнього процесу.

Адаптивність системи через механізми машинного навчання дозволяє їй покращуватися з часом та пристосовуватися до специфіки конкретного ЗВО. Модульна архітектура забезпечує масштабованість рішення та можливість впровадження в різних освітніх закладах з мінімальними змінами.

Інтеграція з єдиною освітньою платформою дозволяє використовувати синергію з іншими модулями системи управління навчальним процесом. Це узгоджується з сучасними тенденціями формування єдиного інформаційного простору ЗВО та використання інформаційних технологій у вищій освіті [13].

7.2. Обмеження та виклики

Система вимагає початкового налаштування параметрів для кожного ЗВО, що може ускладнювати впровадження. Складність налаштування пов'язана з необхідністю визначення індивідуальних профілів учасників та специфічних обмежень освітнього закладу.

Багатокритеріальна оптимізація потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих ЗВО з великою кількістю учасників та складними обмеженнями. Обчислювальна складність зростає експоненційно з розміром задачі, що вимагає ефективних алгоритмічних рішень.

Деякі антропоцентричні критерії важко формалізувати математично через їх суб'єктивну природу. Суб'єктивність критеріїв потребує використання нечітких методів та постійного підтримання зворотного зв'язку із користувачами для корекції моделей.

7.3. Перспективи розвитку

Перспективи розвитку системи включають інтеграцію з IoT-пристроями для моніторингу реального стану учасників освітнього процесу. Використання носимих пристроїв дозволить отримувати об'єктивні дані про рівень стресу, втоми та концентрації уваги, що значно покращить точність антропоцентричних моделей.

Розширена аналітика настрою та емоційного стану через обробку природної мови відкриває можливості для аналізу текстових відгуків учасників освітнього процесу. Це дозволить автоматично виявляти проблемні аспекти розкладу та адаптувати систему відповідно до потреб користувачів.

Федеративне навчання між різними ЗВО може значно покращити якість моделей при збереженні приватності даних. Обмін знаннями про ефективні підходи до диспетчеризації між освітніми закладами дозволить створити більш універсальні та точні моделі антропоцентричної оптимізації.

Розвиток алгоритмів глибокого навчання для прогнозування оптимальних розкладів на основі великих обсягів історичних даних може підвищити якість

диспетчеризації. Використання нейронних мереж дозволить виявляти складні нелінійні залежності між характеристиками розкладу та задоволеністю учасників.

Інтеграція з системами віртуальної та доповненої реальності відкриває нові можливості для візуалізації розкладів та взаємодії з системою. Імерсивні технології можуть значно покращити user experience та зробити процес планування більш інтуїтивним.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розроблено математичні структури та програмні засоби антропоцентричної диспетчеризації навчального процесу у ЗВО, що забезпечують оптимальний баланс між технічними обмеженнями та людськими потребами. Проаналізовано предметну область та виявлено ключові вузькі місця традиційних підходів до диспетчеризації, які ігнорують циркадні ритми, психологічне навантаження та когнітивну сумісність дисциплін.

Формалізовано задачу антропоцентричної диспетчеризації як багатокритеріальну оптимізацію з урахуванням функцій циркадної активності, психологічного комфорту та когнітивної ефективності. Розроблено математичні моделі учасників освітнього процесу, що включають індивідуальні циркадні профілі, функції психологічної стійкості та нечіткі моделі комфорту.

Створено гібридний генетичний алгоритм з елементами нечіткої оптимізації та механізмами адаптивного навчання для розв'язання поставленої задачі. Алгоритм поєднує переваги глобального пошуку з можливістю врахування невизначеності в антропоцентричних критеріях та адаптації до специфіки конкретного ЗВО.

Розроблено архітектуру програмного засобу як модуля єдиної освітньої платформи з використанням сучасного технологічного стеку .NET 9. Система включає модулі оптимізації, машинного навчання, візуалізації та інтеграції, що забезпечують комплексний підхід до антропоцентричної диспетчеризації.

Експериментальна апробація в НАУ "ХАІ" підтвердила ефективність запропонованого підходу. Підвищення задоволеності учасників освітнього процесу на 42%, покращення академічної успішності на 18% та зменшення психологічного навантаження на 35% демонструють практичну цінність розробленого рішення.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці комплексного математичного апарату для формалізації антропоцентричних критеріїв диспетчеризації та створенні адаптивних алгоритмів оптимізації з урахуванням людського фактору. Вперше запропоновано математичні моделі циркадної активності та психологічного навантаження для задач диспетчеризації у ЗВО.

Практична значимість визначається можливістю покращення якості освітнього процесу через оптимізацію розкладу з урахуванням потреб усіх учасників. Розроблене рішення може бути впроваджено в будь-якому ЗВО як частина єдиної освітньої платформи, що відповідає сучасним тенденціям цифрової трансформації освіти.

Перспективи подальших досліджень включають розвиток алгоритмів глибокого навчання для прогнозування оптимальних розкладів, інтеграцію з IoT-системами для моніторингу стану учасників та створення федеративних моделей навчання між різними ЗВО. Антропоцентричний підхід до диспетчеризації відкриває нові можливості для підвищення ефективності освітнього процесу та благополуччя всіх його учасників.

Список літератури

1. Ягупов В. В. Методологічні підходи до розбудови єдиного відкритого інформаційного простору професійної освіти в закладі вищої освіти / В. В. Ягупов // Forum-SOIS, 2024: Розбудова єдиного відкритого інформаційного простору освіти впродовж життя : зб. матеріалів 6-го Міжнар. наук.-практ. WEBфоруму / Нілан-ЛТД. – Вінниця, 2024. – Вип. 5. – С. 75–78, <https://doi.org/10.33407/lib.NAES.740977>.
2. Биков В. Ю. Цифрова трансформація суспільства і розвиток комп'ютерно-технологічної платформи освіти і науки України / В. Ю. Биков // Інформаційно-цифровий освітній простір України: трансформаційні процеси і перспективи розвитку : матеріали методологічного семінару НАПН України, 4 квітня 2019 р. – 2019. – С. 5–18, <https://lib.iitta.gov.ua/718692/>.
3. Пилипчук А. Єдиний інформаційний простір системи освіти України: структура і параметри / А. Пилипчук // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2009. – Т. 9, № 1, <http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/12/4>.
4. Karpliuk S. O. Огляд функціональних можливостей програмного забезпечення для управління освітнім процесом закладу вищої освіти / S. O. Karpliuk, T. A. Vakaliuk // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2018. – Т. 65. – С. 262–276, <https://doi.org/10.33407/itlt.v65i3.1961>.
5. Данилишина К. Структура інформаційного освітнього середовища та використання його у підготовці майбутніх педагогів професійного навчання / К. Данилишина // Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету. – 2019. – Спецвип. – С. 63–76, <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2019s6>.
6. Voloshinov S. Realities and prospects of distance learning at higher education institutions of Ukraine / S. Voloshinov, V. Kruglyk, V. Osadchyi, K. Osadcha, S. Symonenko // Ukr. J. Educ. Stud. Inf. Technol. – 2020. – Vol. 8. – P. 1–16, <https://doi.org/10.32919/uesit.2020.01.01>.
7. Zvavahera P. The use of information and communication technology in supervising open and distance learning PhD students / P. Zvavahera, F. Masimba // Ukr. J. Educ. Stud. Inf. Technol. – 2019. – Vol. 7, № 3. – P. 32–41, <https://doi.org/10.32919/uesit.2019.03.04>.
8. Bali M. Framing open educational practices from a social justice perspective / M. Bali, C. Cronin, R. S. Jhangiani // J. Interact. Media Educ. – 2020. – P. 1–12, <https://doi.org/10.5334/jime.565>.
9. Kovalenko O. Modern Electronic Educational Technologies in the Process of E-Learning / O. Kovalenko, I. Hontarenko // Educ. Chall. – 2023. – Vol. 28. – P. 98–112, <https://doi.org/10.34142/2709-7986.2023.28.1.08>.
10. Ягупов В. В. Ціннісно-мотиваційний компонент професійної компетентності фахівців: методологічний аспект / В. В. Ягупов // Вісник Національного університету оборони України. – 2022. – Т. 6, № 64. – С. 207–219, <https://doi.org/10.33099/2617-6858-2022-70-6-207-219>.
11. Яремчук Н. Шляхи формування віртуального освітнього простору закладу вищої освіти / Н. Яремчук, Н. Сениця // Вісник Львівського університету. Серія педагогічна. – 2021. – Т. 35. – С. 227–235, <https://doi.org/10.30970/vpe.2021.35.11329>.
12. Otto D. Trends and Gaps in Empirical Research on Open Educational Resources (OER): A Systematic Mapping of the Literature from 2015 to 2019 / D. Otto, N. Schroeder, D. Diekmann, P. Sander // Contemp. Educ. Technol. – 2021. – Vol. 13, № 4. – P. ep325, <https://doi.org/10.30935/cedtech/11145>.

13. Polianovskyi H. Utilization of Information Technologies in Higher Education / H. Polianovskyi, T. Zatonatska, I. Liutyi // 2019 IEEE Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). – Ukraine : IEEE, 2019. – P. 349–354, <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030449>.

14. Zulaiha D. Students' perception toward the use of open educational resources to improve writing skills / D. Zulaiha, Y. Triana // Stud. Engl. Lang. Educ. – 2023. – Vol. 10, № 1. – P. 174–196, <https://doi.org/10.24815/siele.v10i1.25797>.

15. Lazorko O. The Safety of Professionalization Subjects in Psychological and Neuropsychological Aspects / O. Lazorko, V. Zhanna, V. Yahupov, O. Valchuk-Orkusha, I. Melnyk, M. Sherman // BRAIN. Broad Res. Artif. Intell. Neurosci. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 19–39, <https://doi.org/10.18662/brain/12.1/168>.

References

1. Iahupov V. V. Metodolohichni pidkhody do rozbudovy yedynoho vidkrytoho informatsiinoho prostoru profesiinoi osvity v zakladi vyshchoi osvity / V. V. Iahupov // Forum-SOIS, 2024: Rozbudova yedynoho vidkrytoho informatsiinoho prostoru osvity vprodovzh zhyttia : zb. materialiv 6-ho Mizhnar. nauk.-prakt. WEBforumu / Nilan-LTD. – Vinnytsia, 2024. – Vyp. 5. – S. 75–78, <https://doi.org/10.33407/lib.NAES.740977>.

2. Bykov V. Iu. Tsyfrova transformatsiia suspilstva i rozvytok kompiuterno-tekhnologichnoi platformy osvity i nauky Ukrainy / V. Iu. Bykov // Informatsiino-tsyfrovyyi osvittii prostir Ukrainy: transformatsiini protsesy i perspektyvy rozvytku : materialy metodolohichnoho seminaru NAPN Ukrainy, 4 kvitnia 2019 r. – 2019. – S. 5–18, <https://lib.iitta.gov.ua/718692/>.

3. Pylypchuk A. Yedynyi informatsiinyi prostir systemy osvity Ukrainy: struktura i parametry / A. Pylypchuk // Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia. – 2009. – T. 9, № 1, <http://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/12/4>.

4. Karpliuk S. O. Ohliad funksiionalnykh mozhlyvostei prohramnoho zabezpechennia dlia upravlinnia osvitim protsesom zakladu vyshchoi osvity / S. O. Karpliuk, T. A. Vakaliuk // Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia. – 2018. – T. 65. – S. 262–276, <https://doi.org/10.33407/itlt.v65i3.1961>.

5. Danylyshyna K. Struktura informatsiinoho osvitnoho seredovyscha ta vykorystannia yoho u pidhotovtsi maibutnikh pedahohiv profesiinoho navchannia / K. Danylyshyna // Vidkryte osvitnie e-seredovysche suchasnoho universytetu. – 2019. – Spetsvyp. – S. 63–76, <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2019s6>.

6. Voloshinov S. Realities and prospects of distance learning at higher education institutions of Ukraine / S. Voloshinov, V. Kruglyk, V. Osadchyi, K. Osadcha, S. Symonenko // Ukr. J. Educ. Stud. Inf. Technol. – 2020. – Vol. 8. – P. 1–16, <https://doi.org/10.32919/uesit.2020.01.01>.

7. Zvavahera P. The use of information and communication technology in supervising open and distance learning PhD students / P. Zvavahera, F. Masimba // Ukr. J. Educ. Stud. Inf. Technol. – 2019. – Vol. 7, № 3. – P. 32–41, <https://doi.org/10.32919/uesit.2019.03.04>.

8. Bali M. Framing open educational practices from a social justice perspective / M. Bali, C. Cronin, R. S. Jhangiani // J. Interact. Media Educ. – 2020. – P. 1–12, <https://doi.org/10.5334/jime.565>.

9. Kovalenko O. Modern Electronic Educational Technologies in the Process of E-Learning / O. Kovalenko, I. Hontarenko // Educ. Chall. – 2023. – Vol. 28. – P. 98–112, <https://doi.org/10.34142/2709-7986.2023.28.1.08>.

10. Iahupov V. V. Tsinnisno-motyvatsiinyi komponent profesiinoi kompetentnosti fakhivtsiv: metodolohichniy aspekt / V. V. Iahupov // Visnyk Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy. – 2022. – T. 6, № 64. – S. 207–219, <https://doi.org/10.33099/2617-6858-2022-70-6-207-219>.

11. Iaremchuk N. Shliakhy formuvannia virtualnoho osvitnoho prostoru zakladu vyshchoi osvity / N. Iaremchuk, N. Senytsia // Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia pedahohichna. – 2021. – T. 35. – S. 227–235, <https://doi.org/10.30970/vpe.2021.35.11329>.

12. Otto D. Trends and Gaps in Empirical Research on Open Educational Resources (OER): A Systematic Mapping of the Literature from 2015 to 2019 / D. Otto, N. Schroeder, D. Diekmann, P. Sander // Contemp. Educ. Technol. – 2021. – Vol. 13, № 4. – P. ep325, <https://doi.org/10.30935/cedtech/11145>.

13. Polianovskyi H. Utilization of Information Technologies in Higher Education / H. Polianovskyi, T. Zatonatska, I. Liutyi // 2019 IEEE Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). – Ukraine : IEEE, 2019. – P. 349–354, <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030449>.

14. Zulaiha D. Students' perception toward the use of open educational resources to improve writing skills / D. Zulaiha, Y. Triana // Stud. Engl. Lang. Educ. – 2023. – Vol. 10, № 1. – P. 174–196, <https://doi.org/10.24815/siele.v10i1.25797>.

15. Lazorko O. The Safety of Professionalization Subjects in Psychological and Neuropsychological Aspects / O. Lazorko, V. Zhanna, V. Yahupov, O. Valchuk-Orkusha, I. Melnyk, M. Sherman // BRAIN. Broad Res. Artif. Intell. Neurosci. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 19–39, <https://doi.org/10.18662/brain/12.1/168>.

Надійшла до редакції 25.08.2025, розглянута на редколегії 25.08.2025

Mathematical Structures and Tools for Anthropocentric Dispatching in Higher Education Institutions

The article investigates mathematical models and algorithmic tools for anthropocentric dispatching of the educational process in higher education institutions. The limitations of traditional approaches to scheduling, which focus exclusively on resource optimization without considering the human factor, are analyzed. It is established that classical dispatching algorithms lead to the creation of technically optimal but psychologically uncomfortable schedules that negatively affect the quality of the educational process.

The concept of anthropocentric dispatching is proposed, which places human needs at the center of the schedule optimization process. Mathematical structures for formal description of anthropocentric criteria have been developed: a model of comfort for educational process participants, functions of psychological load for teachers and students, metrics of cognitive learning efficiency. A multi-criteria optimization model based on fuzzy set theory and genetic algorithms is presented.

The architecture of an anthropocentric dispatching software tool is described in detail, including a behavioral pattern analysis module, a machine learning system for predicting optimal schedules, and an adaptive visualization interface. Experimental testing at NAU "KhAI" showed an increase in satisfaction of educational process participants by 42%, a reduction in cognitive load by 35%, and an improvement in academic performance by 18% compared to traditional dispatching methods.

Keywords: anthropocentric dispatching, multi-criteria optimization, fuzzy sets,

genetic algorithms, cognitive load, mathematical modeling, machine learning.

Відомості про авторів:

Ситнік Олег Олександрович – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, ел. пошта: o.sytnik@khai.edu, orcid: 0009-0009-4504-3489

Вдовітченко Олександр Валерійович – к.т.н., доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, ел. пошта: o.vdovitchenko@khai.edu, orcid: 0000-0002-3144-1234

About the Authors:

Oleh Sytnik – PhD student of the Department of Software Engineering of the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.sytnik@khai.edu, orcid: 0009-0009-4504-3489

Oleksandr Vdovitchenko – Ph.D., Associate Professor of the Software Engineering Department of the National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine e-mail: o.vdovitchenko@khai.edu, orcid: 0000-0002-3144-1234