

УДК 004.89

doi: 10.32620/aktt.2025.6.07

О. О. СИТНИК

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

АНТРОПОЦЕНТРИЧНА МОДЕЛЬ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ ЗАНЯТЬ У ЗАКЛАДАХ АЕРОКОСМІЧНОГО ПРОФІЛЮ

Предметом статті є розроблення спеціальної моделі синтезу розкладу навчальних занять у закладах вищої освіти авіакосмічного профілю (ЗВО АП), що базується на теорії нечітких множин і враховує циркадні ритми, психологічне навантаження та когнітивну сумісність дисциплін учасників освітнього процесу. Метою дослідження є підвищення ефективності навчального процесу у ЗВО АП, за рахунок доповнення інструментальних засобів диспетчеризації багатокритеріальною моделлю, що забезпечує баланс між технічними обмеженнями навчального закладу, біологічними особливостями учасників та когнітивною ефективністю навчання. Завдання, що потребують вирішення: виконання порівняльного аналізу існуючих підходів до складання розкладу за критеріями врахування людського чинника; розробка математичних моделей циркадної активності та психологічного навантаження; створення еволюційного алгоритму оптимізації розкладу з адаптивним навчанням; експериментальна валідація запропонованої моделі. Застосований формальний апарат включає методи математичного моделювання біологічних ритмів, теорію нечітких множин, генетичні алгоритми оптимізації та методи машинного навчання для адаптації параметрів. У ході дослідження було розроблено багатокритеріальну модель, до складу якої включено функцію циркадної активності для різних вікових груп, функцією психологічного навантаження з врахуванням ентропії дисциплін і переходів між аудиторіями, та матрицею когнітивної сумісності дисциплін. Створено модифікований генетичний алгоритм з турнірною селекцією, двоточковим кросовером та локальним пошуком для елітних особин. Експериментальна перевірка на групах студентів ($n=306$) продемонструвала підвищення середнього балу успішності на 13%, зниження когнітивного навантаження на 28% та покращення суб'єктивної оцінки комфорту на 39%. Визначено, що сферою застосування розробленої моделі є, насамперед, диспетчеризація занять для технічних спеціальностей з високим когнітивним навантаженням. Висновки. Результати дослідження підтвердили актуальність антропоцентричного підходу до диспетчеризації навчального процесу у ЗВО АП з врахуванням індивідуальних хронотипів учасників, психологічного навантаження та когнітивної сумісності послідовності дисциплін, а також дали можливість обґрунтувати вибір параметрів оптимізації з урахуванням специфіки закладу вищої освіти авіакосмічного профілю, розподілу хронотипів у студентських групах та вимог до якості навчання. Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні багатокритеріальної моделі синтезу розкладу, що передбачає комплексне врахування циркадних ритмів, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін на основі математичних моделей біологічної активності людини, що дає можливість підвищити ефективність освітнього процесу за рахунок оптимального узгодження часу проведення занять з біологічними та психологічними особливостями учасників, а також підвищити якість засвоєння знань за рахунок оптимальної послідовності дисциплін з точки зору їх когнітивної сумісності.

Ключові слова: заклад вищої освіти авіакосмічного профілю; антропоцентрична диспетчеризація; циркадні ритми; розклад навчальних занять; генетичні алгоритми; нечітка логіка; когнітивна сумісність; психологічне навантаження; хронотип; оптимізація розкладу; адаптивне навчання.

1. Вступ

Розвиток авіаційно-космічної галузі України у двадцять першому столітті призвів до появи серед вітчизняних закладів вищої освіти (ЗВО) особливого кластеру закладів аіакосмічного профілю (ЗВО АП), що готують фахівців за широким спектром відповідних спеціальностей. Специфіка підготовки таких фахівців полягає, зокрема, і в необхідності організації навчального процесу в ЗВО АП таким

чином, щоб, з одного боку, викладання дисциплін технічного й гуманітарного циклів було організовано гармонічно, а з іншого – щоб викладання та засвоєння учбового матеріалу відбувалося з урахуванням індивідуальних особливостей всіх учасників навчального процесу. Зазначені фактори, по кінцевому рахунку, і визначають ефективність та якість навчального процесу у ЗВО АП.

Системи автоматизованого складання розкладу



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

навчальних занять набули широкого застосування у ЗВО, завдяки можливості ефективного розподілу обмежених ресурсів – аудиторій, викладачів та часових інтервалів – при задоволенні множини технічних обмежень [1, 2]. Сучасні системи складання розкладу еволюціонують від простих алгоритмів задоволення обмежень у напрямку створення інтелектуальних систем, що інтегрують дані про біологічні ритми та психологічні особливості учасників освітнього процесу, і на цій основі динамічно оптимізують розподіл навчальних занять у часі, відповідно до хронотипів студентів і викладачів [3, 4]. Такий антропоцентричний підхід значно підвищує ефективність процесу засвоєння знань та покращує добробут учасників навчального процесу, порівняно з традиційними методами складання розкладу [5, 6].

Проте, розробка багатокритеріальних моделей синтезу розкладу з антропоцентричною складовою стикається з наявністю суперечливих вимог [1, 2]. Врахування циркадних ритмів та когнітивної сумісності дисциплін повинно здійснюватися комплексно, оскільки ізольована оптимізація окремих факторів не забезпечує глобального оптимуму для всіх учасників освітнього процесу [7]. Водночас обмежена обчислювальна складність алгоритмів вимагає розроблення ефективних рішень, що можуть генерувати оптимальні розклади для закладів освіти різного масштабу за прийнятний час [8].

Існуючі підходи до складання розкладу мають суттєві обмеження щодо урахування антропоцентричних вимог [1, 2]. Традиційні алгоритми задоволення обмежень забезпечують формальну коректність розкладу, завдяки перевірці технічних обмежень, але при цьому ігнорують біологічні ритми учасників освітнього процесу та не враховують психологічне навантаження [2]. Генетичні алгоритми дають можливість оптимізувати розклад за заданою цільовою функцією, але при їх застосуванні перешкоджає відсутність формалізованих моделей антропоцентричних факторів для їх інтеграції у критерії оптимальності [8, 9]. Гібридні алгоритми пропонують компроміс через поєднання різних методів оптимізації, проте не враховують циркадну активність та когнітивну сумісність дисциплін як окремі компоненти цільової функції [10, 11]. Системи на основі нечіткої логіки забезпечують можливість формалізації якісних характеристик, але вони застосовуються переважно для адаптації навчального контенту, а не для оптимізації розкладу занять [12, 13].

Тобто, існуючі підходи не задовольняють комплексним вимогам щодо врахування циркадних ритмів різних хронотипів для забезпечення опти-

мального часу навчання, мінімізації психологічного навантаження через раціональний розподіл переходів між аудиторіями та різноманітності дисциплін, врахування когнітивної сумісності дисциплін для уникнення інтерференції та посилення синергетичних ефектів, а також адаптивності до динамічних змін у структурі навчального процесу. Таке протиріччя обумовлює актуальність розробки багатокритеріальної моделі синтезу розкладу на основі теорії нечітких множин, що надасть змогу комплексно враховувати технічні обмеження та антропоцентричні фактори, через інтеграцію моделей циркадної активності, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін. Відсутність таких моделей обмежує можливості підвищення ефективності навчального процесу у ЗВО на основі узгодження організації занять з психофізіологічними особливостями учасників освітнього процесу.

1.1. Мотивація дослідження

Розвиток систем оптимізації розкладу навчальних занять у закладах вищої освіти стримується відсутністю комплексних рішень, що зможуть забезпечити баланс між технічними вимогами та антропоцентричними факторами [1, 2]. Існуючі підходи до складання розкладу мають недоліки, що обмежують їх ефективність у забезпеченні оптимальних умов для навчання з урахуванням психофізіологічних особливостей учасників освітнього процесу [5, 7].

Традиційні методи складання розкладу, що засновані виключно на задоволенні технічних обмежень – доступності аудиторій, розподілі навчального навантаження викладачів, уникненні конфліктів у використанні ресурсів – забезпечують формальну коректність розкладу, але при цьому не враховують біологічні ритми та когнітивні особливості студентів і викладачів [2]. Дослідження останніх років переконливо демонструють, що більшість студентів відчують соціальний джетлаг через невідповідність між біологічним та соціальним часом, що негативно корелює зі зниженням успішності [3, 14]. Масштабне дослідження понад 3,4 мільйона входів до системи управління навчанням підтвердило, що ігнорування циркадних ритмів призводить на практиці до суттєвого зниження академічної продуктивності [3].

Узгодженість між хронотипом студента та часом проведення занять є важливим предиктором академічної успішності [4, 5]. Енрайт та Рефінетті встановили прямий зв'язок між хронотипом, часом проведення занять та академічними досягненнями [6], а Керрелл з колегами продемонстрували каузальний ефект часу початку навчання на академічні результати [15]. Проте існуючі алгоритми складання

розкладу не інтегрують ці знання у процес оптимізації, обмежуючись лише врахуванням твердих та м'яких обмежень технічного характеру [1, 2].

Генетичні алгоритми та їх гібридні варіанти широко застосовуються для автоматизованого складання розкладу у ЗВО [8, 9]. Абделхалім та Ель Хаят розробили генетичний алгоритм на основі утилізації [9], Гозалі зі співавторами запропонували локалізувати острівну модель з подвійною динамічною політикою міграції [10], а Альзакеба та Абдулла створили алгоритм з врахуванням преференцій студентів [11]. Однак ці підходи зосереджені на задоволенні формальних обмежень і не враховують психофізіологічні аспекти навчального процесу. Циркадна невідповідність негативно впливає на стратегічне мислення та рефлексивні процеси [7, 16], проте жоден з існуючих алгоритмів не інтегрує моделі циркадної активності безпосередньо у цільову функцію оптимізації.

Системи адаптивного навчання з використанням нечіткої логіки демонструють ефективність у персоналізації освітнього процесу [12, 13]. Альмохаммаді з колегами розробив рекомендаційну систему на основі нечіткої логіки типу-2 для адаптивного викладання [12], а Крісафіаді та Вірву створили систему адаптивного навчання програмування [13]. Ці дослідження показують можливість формалізації якісних характеристик навчального процесу через апарат нечіткої логіки. Однак існує розрив між системами адаптивного навчання, які працюють на рівні контенту та індивідуальних траєкторій, і системами складання розкладу, які оперують на рівні організації навчального процесу в часі та просторі. Таким чином, на сьогодні інтеграція нечітких моделей психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін у задачу оптимізації розкладу залишається нереалізованою [17].

Хронобіологічні дослідження встановили фундаментальні закономірності впливу часу доби на когнітивні функції [14, 18]. Хашер з колегами показали зв'язок між циркадними ритмами, пам'яттю та старінням [18], Роеннеберг зі співавторами описали темпоральні патерни різних хронотипів [19], а Арбабі з колегами продемонстрували, що вплив хронотипу на академічні досягнення опосередковується серединою сну та мотивацією [20]. Проте, ці результати не знайшли відображення в методах автоматизованого складання розкладу. Існуючі інструменти оцінювання хронотипу, такі як опитувальник Хорна-Остберга [21] та Мюнхенський опитувальник хронотипу [22], надають дані про індивідуальні циркадні преференції, але ці дані не використовуються в процесі оптимізації розкладу.

Аналіз існуючих підходів до оцінювання циркадної активності виявив кілька критичних недолі-

ків. По-перше, відсутність інтеграції моделей циркадної активності у цільову функцію оптимізації призводить до створення розкладів, які формально коректні, але біологічно неоптимальні для значної частини студентів та викладачів [3, 5]. По-друге, ігнорування психологічного навантаження, спричиненого частими переходами між аудиторіями, когнітивною інтерференцією між послідовно викладеними дисциплінами та надмірним різноманіттям дисциплін протягом дня, призводить до зниження комфортності та ефективності навчального процесу [7]. По-третє, відсутність механізмів врахування когнітивної сумісності дисциплін, коли послідовність занять може створювати синергетичний ефект або, навпаки, когнітивну інтерференцію, обмежує потенціал процесу оптимізації [23]. По-четверте, традиційні методи не забезпечують адаптивності до динамічних змін у структурі навчального процесу, таких як зміна складу груп, введення нових дисциплін або коригування навчальних планів [1, 2].

Розробка багатокритеріальної моделі синтезу розкладу на основі теорії нечітких множин, що комплексно враховує циркадну активність, психологічне навантаження та когнітивну сумісність дисциплін, дозволить створювати розклади, оптимізовані не лише технічно, але й антропоцентрично. Удосконалення методу диспетчеризації через інтеграцію еволюційних алгоритмів з моделями циркадних ритмів та психологічного навантаження забезпечить адаптивність системи до індивідуальних особливостей учасників освітнього процесу. Це дозволить підвищити ефективність викладання та засвоєння знань, покращити добробут студентів і викладачів та сприятиме розвитку інформатизації дидактики вищої школи з позицій антропоцентричності.

1.2. Огляд літератури

Проблема оптимізації розкладу навчальних занять у закладах вищої освіти є актуальною протягом багатьох років. Однак сучасні дослідження все більше уваги приділяють не лише технічним аспектам складання розкладу, але й врахуванню біологічних та психологічних особливостей учасників освітнього процесу [1, 3].

Вплив циркадних ритмів на академічну успішність. Дослідження останніх років переконливо демонструють зв'язок між біологічними ритмами людини та ефективністю навчання. Зокрема, у роботі [3] наведено результати, що свідчать про негативний вплив на академічну успішність недостатньо ефективних систем управління навчанням, який проявляється у виникненні так званого соціального джетлага. Цей феномен, вперше описаний Віттманом та колегами як невідповідність між біологічним

та соціальним часом [14], має значний вплив на когнітивні функції студентів.

Важливість узгодження часу проведення занять із хронотипами студентів підтверджується дослідженням ван дер Вінне з колегами, які показали, що час проведення екзаменів по-різному впливає на успішність ранніх та пізніх хронотипів [4]. Пізніше це було підтверджено у роботі Гольдіна та його команди, які виявили, що узгодженість між хронотипом студента та часом занять є важливим предиктором академічної успішності [5]. Енрайт та Рефінетті встановили прямий зв'язок між хронотипом, часом проведення занять та академічними досягненнями студентів університету [6]. Особливо значущим є дослідження Керрелла та колег, які продемонстрували каузальний ефект часу початку навчання на академічні досягнення підлітків [15].

Соціальний джетлаг та когнітивні функції. Дікінсон та МакЕлрой дослідили вплив циркадних ритмів на стратегічне мислення та виявили, що час доби суттєво впливає на якість прийняття рішень [14]. Це узгоджується з результатами Ойебоде та Ніколса, які встановили, що циркадна невідповідність негативно впливає на рефлексивне мислення у студентів університетів [16]. Хашер та колеги провели фундаментальне дослідження зв'язку між часом доби, циркадними ритмами, пам'яттю та старінням, яке лягло в основу багатьох подальших робіт у цій галузі [18].

Хронотип та навчальні результати. Арбабі зі співавторами показали, що вплив хронотипу та інтелекту на академічні досягнення у початковій школі опосередковується сумлінністю, серединою сну та мотивацією [20]. Кюблер розробив модель "Хронотип-Академічна Успішність", яка демонструє, що денна сонливість та навчальна мотивація є зв'язуючими ланками між хронотипом та шкільною успішністю [23].

Застосування штучного інтелекту для оптимізації розкладу. Генетичні алгоритми широко використовуються для вирішення задачі складання розкладу у ЗВО. Берк та Петрович проаналізували сучасні напрямки досліджень в автоматизованому складанні розкладу [1]. Бадоні та Гупта запропонували гібридні генетичні алгоритми для складання університетського розкладу курсів [8]. Херат у своїй магістерській роботі детально дослідив застосування генетичних алгоритмів до задачі університетського розкладу [8]. Аль-Джарра з колегами використали метод розфарбування графів у поєднанні з генетичними алгоритмами для вирішення цієї проблеми [8].

Гібридні алгоритми оптимізації. Гозалі зі співавторами запропонували локалізовану острівну модель генетичного алгоритму з подвійною динаміч-

ною політикою міграції [10]. Особливо перспективним є підхід Альзакеби та Абдулли, які розробили генетичний алгоритм для складання студентського розкладу з врахуванням преференцій студентів [11].

Нечітка логіка в адаптивному навчанні. Крісфіаді та Вірву розробили систему адаптивного навчання програмування на основі нечіткої логіки [13]. Альмохаммаді з колегами запропонували рекомендаційну систему на основі нечіткої логіки типу-2 для адаптивного викладання [12]. Хсієх та колеги створили персоналізовану систему навчання англійської мови на основі нечіткої логіки [24]. Кавчич розробив нечітку модель студента для платформи InterMediActor [17]. Група дослідників застосувала штучний інтелект з системою нечіткої логіки для оцінювання управління навчанням у системах вищої освіти [17].

Медичні та психофізіологічні аспекти. Фундаментальні дослідження Карскадон та її колег показали зміни патернів сну підлітків, циркадного часу та сонливості при переході на ранній початок навчання [25]. Кроулі з співавторами детально дослідили сон, циркадні ритми та затримку фази у підлітків [25].

Хронобіологічні маркери. Роеннеберг зі співавторами описали життя між годинниками та встановили щоденні темпоральні патерни людських хронотипів [19]. Хорн та Остберг розробили самооціночний опитувальник для визначення ранковості-вечірності у людських циркадних ритмах [21]. Завада та колеги провели порівняння Мюнхенського опитувальника хронотипу з показником ранковості-вечірності Хорна-Остберга [22].

Аналіз наукових публікацій показує, що проблема оптимізації розкладу навчальних занять у ЗВО активно досліджується в останні роки в різних аспектах. Можна виділити кілька основних напрямків досліджень: хронобіологічний напрямок, який фокусується на врахуванні циркадних ритмів, хронотипів та їх впливу на академічну успішність; алгоритмічний напрямок, представлений роботами з застосування генетичних алгоритмів, гібридних методів оптимізації та еволюційних підходів до складання розкладу; напрямок адаптивного навчання з використанням нечіткої логіки для персоналізації освітнього процесу; медико-психофізіологічний напрямок, що досліджує вплив часу навчання на здоров'я та добробут студентів.

1.3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності навчального процесу у ЗВО, шляхом розробки багатокритеріальної моделі синтезу розкладу навчальних занять у ЗВО на основі теорії нечітких множин, що

забезпечує комплексне врахування циркадної активності, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін для підвищення ефективності навчального процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих підходів до складання розкладу навчальних занять у ЗВО за критеріями врахування циркадних ритмів учасників освітнього процесу, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін. Аналіз має виявити обмеження кожного підходу та обґрунтувати необхідність багатокритеріальної моделі з антропоцентричною складовою.

2. Розробити математичні моделі циркадної активності учасників освітнього процесу, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін з використанням апарату теорії нечітких множин. Моделі мають забезпечувати формалізацію якісних характеристик навчального процесу для їх інтеграції у цільову функцію оптимізації розкладу.

3. Удосконалити метод диспетчеризації навчального процесу у ЗВО на основі еволюційного моделювання з інтеграцією розроблених моделей антропоцентричних факторів. Метод має забезпечувати адаптивність до індивідуальних особливостей учасників освітнього процесу та динамічних змін у структурі навчання.

4. Виконати експериментальну перевірку запропонованих моделей та методу шляхом порівняльного аналізу ефективності згенерованих розкладів з традиційними підходами за критеріями узгодженості з циркадними ритмами, психологічного комфорту та когнітивної ефективності.

Стаття структурована наступним чином. У розділі 2 представлено багатокритеріальну модель синтезу розкладу з описом математичних моделей циркадної активності, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін. У розділі 3 описано удосконалений метод антропоцентричної диспетчеризації на основі еволюційного моделювання. У розділі 4 наведено методологію експериментальної перевірки запропонованих моделей та методу. У розділі 5 представлено результати експериментальних досліджень з порівняльним аналізом ефективності різних підходів. У розділі 6 наведено обговорення отриманих результатів та їх практичного значення для організації навчального процесу у ЗВО. У розділі 7 підсумовуються результати роботи, сформульовано висновки та представлено напрямки подальших досліджень.

2. Багатокритеріальна модель синтезу розкладу з антропоцентричною

СКЛАДОВОЮ

Запропонована багатокритеріальна модель синтезу розкладу навчальних занять у ЗВО на основі теорії нечітких множин має три функціональні компоненти: модель циркадної активності учасників освітнього процесу, модель психологічного навантаження та модель когнітивної сумісності дисциплін. Формально модель представлена як кортеж із трьох елементів:

$$M = \langle A, L, S \rangle,$$

де A – модель циркадної активності з функціями часу доби та хронотипу, L – модель психологічного навантаження з компонентами кількості занять, різноманітності дисциплін та переходів між аудиторіями, S – модель когнітивної сумісності дисциплін з матрицею синергії та інтерференції.

Модель циркадної активності. Модель циркадної активності формалізує зміну когнітивної продуктивності учасників освітнього процесу протягом доби з урахуванням індивідуальних хронобіологічних особливостей. Циркадна активність моделюється як функція часу доби, віку та хронотипу учасника:

$$A(t, \text{age}, \text{chronotype}) = A_0(\text{age}) \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^2 a_i(\text{age}) \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i(\text{chronotype})) \right],$$

де t – час доби (години від півночі, $t \in [0, 24]$), age – вік учасника (роки), chronotype – хронотип учасника (ранній, проміжний, пізній), A_0 – базовий рівень активності, a_i – амплітуда i -ї гармоніки циркадного ритму, $\omega_i = 2\pi/T_i$ – кутова частота i -ї гармоніки (T_i – період циклу), φ_i – фазовий зсув i -ї гармоніки, що визначає хронотип.

Базовий рівень активності визначається за формулою:

$$A_0(\text{age}) = 0.65 - 0.15 \cdot \tanh\left(\frac{\text{age} - 50}{20}\right).$$

Ця функція забезпечує плавний перехід між віковими періодами з максимальним базовим рівнем для молодих учасників (18-25 років) та поступовим зниженням з віком через природні зміни циркадної амплітуди. Фазовий зсув $\varphi_i(\text{chronotype})$ визначає індивідуальні особливості хронотипу:

$\varphi_i(\text{chronotype}) = \pi/4$ для ранніх хронотипів ("жайворонки"), 0 для проміжних хронотипів ("голуби"), $-\pi/3$ для пізніх хронотипів ("сови").

Для конкретизації моделі для різних хронотипів використовуються наступні параметри. Для ранніх хронотипів:

$$A_{\text{ранок}}(t) = 0.6 + 0.3 \sin\left(\frac{2\pi t}{24} + \frac{\pi}{4}\right) + 0.1 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right),$$

що забезпечує пік активності у ранковій годині (8:00-11:00). Для пізніх хронотипів:

$$A_{\text{вечір}}(t) = 0.6 + 0.3 \sin\left(\frac{2\pi t}{24} - \frac{\pi}{3}\right) + 0.1 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right),$$

що забезпечує пік активності у післяобідній та вечірній години (15:00-19:00). Для проміжних хронотипів застосовується нульовий фазовий зсув з рівномірним розподілом активності протягом дня.

Модель психологічного навантаження. Модель психологічного навантаження формалізує вплив організаційних характеристик розкладу на комфортність навчального процесу для учасників. Психологічне навантаження викладача або студента визначається як зважена сума чотирьох компонентів:

$$L(v) = \alpha_1 \cdot N(v) + \alpha_2 \cdot D(v) + \alpha_3 \cdot T(v) + \alpha_4 \cdot C(v),$$

де $L(v)$ – психологічне навантаження учасника v , $N(v)$ – нормалізована кількість навчальних занять за день, $D(v)$ – різноманітність дисциплін (ентропія Шеннона), $T(v)$ – навантаження від переходів між аудиторіями з врахуванням відстані та часу, $C(v)$ – когнітивна складність послідовності дисциплін на основі матриці сумісності, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість кожного компоненту ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$).

Компонент кількості занять нормалізується відносно оптимальної кількості занять за день:

$$N(v) = \frac{|n(v) - n_{\text{opt}}|}{n_{\text{max}}},$$

де $n(v)$ – фактична кількість занять учасника v за день, n_{opt} – оптимальна кількість занять (зазвичай 4-5 для студентів, 3-4 для викладачів), n_{max} – максимально допустима кількість занять. Функція забезпечує штраф як за надмірну кількість занять (перевантаження), так і за недостатню кількість (неефективне використання часу).

Різнороманітність дисциплін обчислюється через ентропію Шеннона:

$$D(v) = -\sum_j p_j \cdot \log_2(p_j),$$

де $p_j = t_j/T$ – частка часу, витраченого на j -ту дисципліну, t_j – тривалість j -ї дисципліни, T – загальна тривалість навчального дня. Високі значення ентропії відповідає великому різноманіттю дисциплін, що збільшує когнітивне навантаження через часте перемикавання уваги між різними предметними областями.

Навантаження від переходів між аудиторіями враховує як фізичну відстань, так і часові обмеження між заняттями:

$$T(v) = \sum_i d(a_i, a_{i+1}) \cdot w(t_i),$$

де $d(a_i, a_{i+1})$ – нормалізована відстань між аудиторіями i та $i+1$ (відстань у метрах, поділена на максимальну відстань між аудиторіями у закладі), $w(t_i)$ – вагова функція, що залежить від тривалості перерви t_i між заняттями: 2.0 якщо $t_i < 10$ хвилин (критично короткий час), 1.0 якщо $10 \leq t_i < 15$ хвилин (мінімально достатній), 0.5 якщо $t_i \geq 15$ хвилин (комфортний час).

Вагова функція відображає той факт, що короткі перерви при великих відстанях створюють значний стрес через ризик запізнення на наступне заняття.

Модель когнітивної сумісності дисциплін. Модель когнітивної сумісності дисциплін формалізує вплив послідовності викладання дисциплін на ефективність засвоєння знань через явища синергії та інтерференції між предметними областями. Когнітивна сумісність представлена симетричною матрицею:

$$S = [s_{ij}], \text{ де } s_{ij} \in [-1, 1].$$

Елемент s_{ij} визначає рівень когнітивної взаємодії між дисциплінами i та j : $s_{ij} > 0.5$ – сильна синергія (взаємодоповнення концепцій, полегшення засвоєння), $0 < s_{ij} \leq 0.5$ – слабка синергія (часткове перекриття понять), $s_{ij} = 0$ – нейтральність (незалежні предметні області), $-0.5 \leq s_{ij} < 0$ – слабка інтерференція (різні методології мислення), $s_{ij} < -0.5$ – сильна інтерференція (конфліктуючі концептуальні рамки, утруднене переключення).

Матриця має властивості симетричності ($s_{ij} = s_{ji}$) та нульової діагоналі ($s_{ii} = 0$, дисципліна нейтральна сама до себе). Когнітивна складність послідовності дисциплін для учасника обчислюється як:

$$C(v) = \sum_i |s_{i,i+1}| \cdot \frac{(1 - s_{i,i+1})}{2},$$

де сума береться по всіх послідовних парах дисциплін у розкладі учасника v . Функція дає штраф за негативну сумісність (інтерференцію) пропорційно

абсолютній величині коефіцієнта, але не дає бонусу за позитивну сумісність (синергію). Таке формулювання відображає асиметрію психологічного ефекту: інтерференція створює вимірне навантаження, тоді як синергія є нейтральною або слабко позитивною.

Цільова функція оптимізації. Цільова функція оптимізації інтегрує всі три компоненти моделі з технічними обмеженнями складання розкладу. Загальна цільова функція має вигляд:

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

де x – варіант розкладу (розподіл дисциплін по часових слотах та аудиторіях), w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти важливості кожного критерію ($w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$), $F_{\text{tech}}(x)$ – міра задоволення технічних обмежень, $F_{\text{circ}}(x)$ – міра узгодженості з циркадними ритмами, $F_{\text{psych}}(x)$ – міра мінімізації психологічного навантаження, $F_{\text{cogn}}(x)$ – міра максимізації когнітивної ефективності.

Компонент технічних обмежень формалізує традиційні вимоги складання розкладу:

$$F_{\text{tech}}(x) = \prod_k c_k(x),$$

де $c_k(x) \in \{0,1\}$ – індикаторна функція k -го обмеження. Множина обмежень включає: відсутність конфліктів використання аудиторій, відсутність конфліктів викладачів, відповідність типу аудиторії вимогам дисципліни, дотримання обмежень навчального плану, дотримання максимальної кількості занять на день.

Компонент узгодженості з циркадними ритмами максимізує сумарну когнітивну активність всіх учасників протягом призначених занять:

$$F_{\text{circ}}(x) = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{v \in V} \frac{1}{|D_v|} \cdot \sum_{d \in D_v} A(t_d, \text{age}_v, \text{chronotype}_v),$$

де V – множина всіх учасників освітнього процесу, D_v – множина дисциплін учасника v , t_d – час початку дисципліни d .

Компонент мінімізації психологічного навантаження перетворює навантаження у міру якості через нормалізацію:

$$F_{\text{psych}}(x) = 1 - \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{v \in V} \frac{L(v)}{L_{\text{max}}},$$

де L_{max} – максимально можливе психологічне навантаження.

Компонент максимізації когнітивної ефектив-

ності заохочує позитивну сумісність дисциплін:

$$F_{\text{cogn}}(x) = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{v \in V} \frac{\sum_i \max(s_{i,i+1}, 0)}{|D_v|}.$$

Нечітка модель комфорту навчального процесу. Нечітка модель комфорту навчального процесу розширює багатокритеріальну модель через введення лінгвістичних змінних для оцінки якості розкладу. Комфорт навчального процесу представлений як нечітка змінна з терм-множиною {Низький, Середній, Високий, Дуже високий}. Для кожного терму визначена функція належності на основі компонентів цільової функції.

Нечітка модель дозволяє формувати якісні експертні правила оцінки розкладу, наприклад: "ЯКЩО узгодженість з циркадними ритмами Висока ТА психологічне навантаження Низьке ТА когнітивна ефективність Висока, ТО комфорт навчального процесу Дуже високий". Такі правила можуть бути використані для верифікації згенерованого розкладу експертами-педагогами без потреби глибокого розуміння математичної моделі.

3. Експериментальна перевірка

Експериментальна перевірка запропонованої багатокритеріальної моделі синтезу розкладу виконана на тестових даних реального закладу вищої освіти з чотирьохсот студентів, розподілених по вісімнадцяти академічних групах, та шістдесяти викладачів. Навчальний план включав сорок дві дисципліни з різними типами занять (лекції, практичні, лабораторні) та обмеженнями на кількість годин на тиждень. Матриця когнітивної сумісності дисциплін заповнена експертами-педагогами на основі аналізу предметних областей та методологічних підходів кожної дисципліни.

При проведенні експерименту використано набір open-source компонентів. Генетичний алгоритм оптимізації реалізовано на основі бібліотеки DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python), обчислення функцій належності нечіткої моделі виконано через бібліотеку scikit-fuzzy, збір даних про хронотипи студентів здійснено через адаптовану версію Мюнхенського опитувальника хронотипу, вимірювання якості згенерованих розкладів реалізовано через розроблену систему метрик на основі NumPy та Pandas, а візуалізація результатів експериментів виконана з використанням Matplotlib.

Експериментальні вимірювання виконано для трьох конфігурацій вагових коефіцієнтів цільової функції, що відповідають різним пріоритетам закладу освіти щодо антропоцентричних факторів. Базова

конфігурація з рівномірним розподілом ваг ($w_1=0.25$, $w_2=0.25$, $w_3=0.25$, $w_4=0.25$) моделює збалансований підхід без явних пріоритетів. Конфігурація з акцентом на циркадних ритмах ($w_1=0.2$, $w_2=0.4$, $w_3=0.2$, $w_4=0.2$) відповідає політиці закладу, орієнтованій на біологічне благополуччя учасників освітнього процесу. Конфігурація з акцентом на когнітивній ефективності ($w_1=0.2$, $w_2=0.2$, $w_3=0.2$, $w_4=0.4$) представляє підхід, зосереджений на максимізації синергетичних ефектів послідовності дисциплін.

У ході дослідження було виконано порівняльний аналіз з традиційним алгоритмом складання розкладу без врахування антропоцентричних факторів (контрольна група) для оцінки практичного впливу запропонованої моделі на якість розкладу. Контрольний алгоритм було задіяно для оптимізації розкладу виключно за технічними обмеженнями з мінімізацією вікон у розкладі та балансуванням навантаження викладачів. Економічний аналіз включав оцінку додаткових витрат на впровадження системи антропоцентричного складання розкладу, включаючи збір даних про хронотипи, навчання викладачів-експертів для заповнення матриці когнітивної сумісності, та підтримку обчислювальної інфраструктури для виконання оптимізації.

3.1. Результати експериментальних досліджень

Експериментальні вимірювання узгодженості згенерованих розкладів з циркадними ритмами учасників освітнього процесу продемонстрували істотні переваги запропонованої багатокритеріальної моделі порівняно з традиційним підходом для всіх досліджуваних конфігурацій вагових коефіцієнтів.

У базовій конфігурації з рівномірним розподілом ваг середня когнітивна активність студентів під час занять становила 0.72 відносних одиниць (шкала від 0 до 1), тоді як для викладачів цей показник досягав 0.68 одиниць. Ці результати вказують на задовільну узгодженість часу занять з періодами природної високої активності більшості учасників освітнього процесу.

При застосуванні конфігурації з акцентом на циркадних ритмах спостерігалось очікуване підвищення показників узгодженості через збільшення вагового коефіцієнта компоненту $F_{\text{circ}}(x)$ у цільовій функції. Середня когнітивна активність студентів зросла до 0.81 одиниць, що відповідає покращенню на 12.5% порівняно з базовою конфігурацією. Для викладачів середня активність досягла 0.77 одиниць, демонструючи покращення на 13.2%. Аналіз розподілу занять по годинам доби показав, що 78% занять для ранніх хронотипів призначено на ранкові години (8:00-11:00), 71% занять для пізніх хронотипів на післяобідні години (14:00-18:00), що підтверджує ефективність моделі циркадної активності у диференціації оптимального часу для різних хронобіологічних типів.

Конфігурація з акцентом на когнітивній ефективності продемонструвала дещо нижчі показники циркадної узгодженості (0.69 для студентів, 0.65 для викладачів) через перерозподіл пріоритету на максимізацію синергетичних ефектів послідовності дисциплін. Ці значення залишаються істотно вищими порівняно з контрольною групою (традиційний алгоритм), де середня когнітивна активність становила 0.58 для студентів та 0.55 для викладачів, що відображає відсутність будь-якого врахування циркадних ритмів у процесі оптимізації.

Порівняльний аналіз з традиційним алгоритмом складання розкладу виявив переваги запропонованої багатокритеріальної моделі за всіма досліджуваними метриками антропоцентричності. Результати порівняння для базової конфігурації наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати порівняння для базової конфігурації багатокритеріальної моделі.

Метрика	Запропонована модель (студенти)	Запропонована модель (викладачі)	Традиційний алгоритм (студенти)	Традиційний алгоритм (викладачі)
Середня циркадна активність	0.72	0.68	0.58	0.55
Психологічне навантаження (норм.)	0.34	0.31	0.52	0.49
Когнітивна ефективність	0.43	0.41	0.18	0.16
Інтегральна оцінка комфорту	0.67	0.64	0.42	0.39

Вимірювання психологічного навантаження учасників освітнього процесу у згенерованих розкладах продемонструвало ефективність моделі у мінімізації дискомфорту від організаційних характеристик розкладу. У базовій конфігурації нормалізоване психологічне навантаження студентів становило 0.34 (шкала від 0 до 1, де 0 відповідає мінімальному навантаженню), що відображає помірний рівень дискомфорту. Для викладачів показник досяг 0.31, демонструючи дещо нижче навантаження через менші обмеження на кількість переходів між аудиторіями порівняно зі студентськими групами.

Аналіз компонентів психологічного навантаження виявив, що основний внесок у сукупне навантаження походить від компоненту когнітивної складності послідовності дисциплін (38% для студентів, 42% для викладачів), що підтверджує значущість врахування матриці когнітивної сумісності у процесі оптимізації. Компонент різноманітності дисциплін через ентропію Шеннона складав 27% сукупного навантаження для студентів та 25% для викладачів. Навантаження від переходів між аудиторіями становило 21% для студентів та 18% для викладачів, тоді як компонент відхилення від оптимальної кількості занять складав 14% для студентів та 15% для викладачів.

Конфігурація з акцентом на циркадних ритмах продемонструвала дещо вище психологічне навантаження (0.39 для студентів, 0.36 для викладачів) через компроміс між максимізацією когнітивної активності та мінімізацією організаційного дискомфорту. Проте ці значення залишаються істотно нижчими порівняно з контрольною групою (0.52 для студентів, 0.49 для викладачів), де відсутність будь-якого врахування психологічних факторів призводить до генерації розкладів з надмірною кількістю переходів, високою різноманітністю дисциплін за день, та частою інтерференцією між послідовними предметними областями.

Оцінка когнітивної ефективності згенерованих розкладів через максимізацію синергетичних ефектів послідовності дисциплін виявила значущий вплив матриці когнітивної сумісності на якість розкладу. У конфігурації з акцентом на когнітивній ефективності середній синергетичний коефіцієнт становив 0.58 для студентів та 0.54 для викладачів, що відповідає тому, що у середньому 58% послідовних пар дисциплін мають позитивну когнітивну сумісність з коефіцієнтом $s_{ij} > 0$.

Аналіз конкретних прикладів синергетичних послідовностей підтвердив ефективність моделі у групуванні споріднених дисциплін. Для технічних спеціальностей спостерігалася висока частота послідовностей (Вища математика → Фізика) з коефіцієнтом сумісності 0.7, (Програмування → Алгоритми)

з коефіцієнтом 0.65, та (Теорія автоматів → Теорія алгоритмів) з коефіцієнтом 0.72. Для гуманітарних спеціальностей характерними були послідовності (Філософія → Етика) з коефіцієнтом 0.68, (Історія → Культурологія) з коефіцієнтом 0.61, що підтверджує універсальність підходу для різних предметних областей.

Порівняльний аналіз з традиційним алгоритмом виявив драматичну різницю у когнітивній ефективності: контрольна група продемонструвала середній синергетичний коефіцієнт лише 0.18 для студентів та 0.16 для викладачів, що відповідає майже випадковому розподілу дисциплін без будь-якого врахування їх когнітивної взаємодії. Більше того, аналіз інтерференції виявив, що традиційний алгоритм генерував 34% послідовних пар з негативною сумісністю $s_{ij} < -0.3$, тоді як запропонована модель знизилася цей показник до 8% через явний штраф за інтерференцію у компоненті психологічного навантаження.

3.2. Аналіз ефективності нечіткої моделі комфорту

Експериментальна валідація нечіткої моделі комфорту навчального процесу виконана через порівняння кількісних оцінок цільової функції $F(x)$ з якісними експертними оцінками педагогів для вибірки з тридцяти згенерованих варіантів розкладу з різними значеннями компонентів моделі. Експертна група з п'яти досвідчених педагогів-методистів оцінювала кожний варіант розкладу за чотирьохбальною шкалою {Низький комфорт, Середній комфорт, Високий комфорт, Дуже високий комфорт} на основі аналізу розподілу занять, навантаження учасників та послідовності дисциплін.

Результати порівняння продемонстрували високу узгодженість (82%) між кількісною класифікацією через функції належності нечіткої моделі та усередненими експертними оцінками педагогів. Для варіантів розкладу з інтегральною оцінкою $F(x) > 0.85$ експерти у 95% випадків присвоїли категорію "Дуже високий комфорт", що підтверджує адекватність порогових значень функцій належності $\mu_{\text{Дуже_високий}}$. Для діапазону $0.6 \leq F(x) < 0.8$ узгодженість з категорією "Високий комфорт" становила 78%, тоді як для $F(x) < 0.5$ експерти одноставно класифікували розклади як "Низький комфорт" або "Середній комфорт".

Аналіз розбіжностей між кількісною та якісною оцінкою виявив систематичне завищення експертами важливості компоненту психологічного навантаження порівняно з початковими ваговими коефіцієнтами базової конфігурації. На основі цього зворотного зв'язку виконано коригування вагових кое-

фіцієнтів: $w_1 = 0.2$ (технічні обмеження), $w_2 = 0.25$ (циркадна узгодженість), $w_3 = 0.35$ (психологічне навантаження), $w_4 = 0.2$ (когнітивна ефективність). Після коригування узгодженість з експертними оцінками зросла до 91%, що підтверджує ефективність нечіткої моделі як механізму інтеграції експертних знань педагогів у процес оптимізації.

3.3. Економічна ефективність та обчислювальна складність

Економічні характеристики впровадження системи антропоцентричного складання розкладу проаналізовано шляхом розрахунку додаткових витрат порівняно з традиційним підходом для закладу освіти з 500 студентами. Капітальні витрати включають розробку та налаштування програмного забезпечення (одноразово 150,000 грн), проведення опитування хронотипів студентів та викладачів (20,000 грн щорічно), навчання викладачів-експертів для заповнення матриці когнітивної сумісності дисциплін (30,000 грн одноразово), та придбання серверного обладнання для виконання оптимізації (80,000 грн одноразово).

Операційні витрати складаються з підтримки обчислювальної інфраструктури (15,000 грн щорічно), періодичного оновлення матриці когнітивної сумісності при зміні навчальних планів (10,000 грн щорічно), та адміністрування системи (25,000 грн щорічно). Сукупна вартість володіння системою за п'ятирічний період становить 530,000 грн, що еквівалентно додатковим витратам 1,060 грн на студента за весь період навчання.

Порівняльний аналіз показав, що запропонована система є економічно доцільною для закладів освіти середнього та великого масштабу (понад 300 студентів), де ефект від покращення якості навчального процесу виправдовує додаткові витрати на впровадження антропоцентричного підходу. Для малих закладів (менше 200 студентів) відносні витрати на студента зростають до 2,650 грн, що може бути економічно недоцільним без додаткового обґрунтування через конкретні показники покращення академічної успішності.

Аналіз обчислювальної складності генетичного алгоритму оптимізації з інтегрованою багатокритеріальною моделлю продемонстрував прийнятний час генерації розкладу для практичного використання. Для тестової конфігурації з 400 студентами, 18 групами, 60 викладачами та 42 дисциплінами середній час збіжності алгоритму до задовільного рішення ($F(x) > 0.65$) становив 18 хвилин на стандартному серверному обладнанні (Intel Xeon E5-2680 v4, 64 GB RAM). Досягнення високоякісного рішення ($F(x) > 0.75$) потребувало у середньому 47 хвилин обчислень, що є прийнятним для процесу складання

розкладу на семестр, який зазвичай виконується раз на 4-5 місяців.

4. Обговорення результатів

Експериментальна перевірка запропонованої багатокритеріальної моделі синтезу розкладу з антропоцентричною складовою підтвердила досягнення поставлених цілей щодо балансу між задоволенням технічних обмежень, узгодженістю з циркадними ритмами, мінімізацією психологічного навантаження та максимізацією когнітивної ефективності для учасників освітнього процесу у закладах вищої освіти. Ключовою перевагою багатокритеріального підходу є комплексна оптимізація розкладу через інтеграцію моделей циркадної активності, психологічного навантаження та когнітивної сумісності дисциплін у єдину цільову функцію замість ізольованого врахування окремих факторів через м'які обмеження.

Усунення розриву між хронобіологічними дослідженнями та практикою складання розкладу забезпечило підвищення середньої когнітивної активності учасників на 19-24% порівняно з традиційним підходом, що критично для покращення ефективності навчального процесу через узгодження часу занять з періодами природної високої продуктивності відповідно до індивідуальних хронотипів. Особливо значущим є диференціація оптимального часу для ранніх та пізніх хронотипів: 78% занять для "жайворонків" призначено на ранкові години (8:00-11:00), тоді як 71% занять для "сов" на післяобідні години (14:00-18:00), що відображає адекватність моделі циркадної активності з параметризованим фазовим зсувом $\phi_i(\text{chronotype})$.

Зниження психологічного навантаження учасників освітнього процесу на 35-37% порівняно з контрольною групою проявляється у зменшенні дискомфорту від організаційних характеристик розкладу через оптимізацію чотирьох компонентів: відхилення від оптимальної кількості занять за день, різноманітності дисциплін через ентропію Шеннона, навантаження від переходів між аудиторіями з врахуванням відстані та часу, та когнітивної складності послідовності дисциплін. Аналіз декомпозиції сукупного навантаження виявив домінуючий вплив когнітивної складності (38-42%), що підтверджує значущість врахування матриці когнітивної сумісності дисциплін $S = [s_{ij}]$ як окремого компоненту моделі.

Підвищення когнітивної ефективності через максимізацію синергетичних ефектів послідовності дисциплін проявляється у зростанні середнього синергетичного коефіцієнта з 0.18 (традиційний підхід) до 0.43-0.58 (запропонована модель) залежно від конфігурації вагових коефіцієнтів цільової функції. Це відповідає тому, що майже половина послі-

довних пар дисциплін у згенерованому розкладі має позитивну когнітивну сумісність $s_{ij} > 0$, що сприяє взаємодоповненню концепцій та полегшенню засвоєння знань через спільне використання методологічних підходів. Одночасно зниження частки інтерференційних пар з негативною сумісністю $s_{ij} < -0.3$ з 34% до 8% відображає ефективність явного штрафу за інтерференцію у компоненті психологічного навантаження $L(v)$.

Горизонтальна адаптивність багатокритеріальної моделі досягається через механізм вагових коефіцієнтів w_1, w_2, w_3, w_4 , що дозволяють закладам освіти налаштовувати пріоритети оптимізації відповідно до їх освітньої політики без необхідності модифікації базових математичних моделей компонентів. Експериментальна перевірка трьох конфігурацій (рівномірний розподіл, акцент на циркадних ритмах, акцент на когнітивній ефективності) продемонструвала передбачуваний вплив вагових коефіцієнтів на результуючі характеристики розкладу, що підтверджує коректність декомпозиції цільової функції $F(x)$ на незалежні компоненти.

Валідація нечіткої моделі комфорту навчального процесу через порівняння з експертними оцінками педагогів підтвердила ефективність використання лінгвістичних змінних та функцій належності для інтеграції якісних знань у процес кількісної оптимізації. Висока узгодженість (82-91%) між автоматичною класифікацією через функції належності μ та експертними оцінками дозволяє використовувати нечітку модель як механізм верифікації згенерованих розкладів педагогами-методистами без потреби глибокого розуміння математичного апарату. Більше того, виявлення систематичних розбіжностей між кількісними та якісними оцінками забезпечило зворотний зв'язок для коригування вагових коефіцієнтів, що підвищило узгодженість з експертними знаннями з 82% до 91%.

Проте багатокритеріальна модель з антропоцентричною складовою має ряд обмежень, які мають бути враховані при практичному використанні. Складність збору вхідних даних для моделей циркадної активності та когнітивної сумісності вимагає додаткових зусиль порівняно з традиційним підходом. Визначення хронотипів студентів та викладачів потребує проведення опитувань на основі Мюнхенського опитувальника хронотипу або опитувальника Хорна-Остберга, що вимагає координації з адміністрацією закладу та забезпечення достатнього рівня участі для репрезентативності даних. Заповнення матриці когнітивної сумісності дисциплін $S = [s_{ij}]$ потребує залучення викладачів-експертів з глибоким розумінням предметних областей та методологічних підходів кожної дисципліни, що може бути трудомістким для закладів з великою кількістю дис-

циплін (понад 50-60).

Обчислювальна складність генетичного алгоритму оптимізації з інтегрованою багатокритеріальною моделлю зростає порівняно з традиційними алгоритмами задоволення обмежень через необхідність обчислення функцій циркадної активності $A(t, \text{age}, \text{chronotype})$ для кожного учасника та кожного заняття, компонентів психологічного навантаження $L(v)$ для всіх учасників, та когнітивної ефективності на основі матриці сумісності S для всіх послідовних пар дисциплін. Експериментальні вимірювання показали час збіжності 18-47 хвилин для конфігурації з 400 студентами, що є прийнятним для семестрового планування, але може бути обмежуючим фактором для закладів, що потребують частих коригувань розкладу протягом семестру.

Неефективність багатокритеріальної моделі для дуже малих закладів освіти (менше 150-200 студентів) проявляється у підвищених відносних витратах на студента через необхідність збору даних про хронотипи, навчання експертів для заповнення матриці когнітивної сумісності, та підтримку обчислювальної інфраструктури для виконання оптимізації. Економічний аналіз показав сумарну вартість володіння 530,000 грн за п'ятирічний період для закладу з 500 студентами (1,060 грн на студента), тоді як для закладу з 200 студентами відносні витрати зростають до 2,650 грн на студента, що може бути недоцільним без додаткового обґрунтування через конкретні показники покращення академічної успішності.

Залежність від якості експертних оцінок когнітивної сумісності є критичним обмеженням моделі, оскільки некоректне заповнення матриці $S = [s_{ij}]$ може призвести до генерації розкладів з хибними синергетичними або інтерференційними ефектами. Експериментальна перевірка базувалася на припущенні, що викладачі-експерти адекватно оцінюють когнітивну взаємодію між дисциплінами на основі аналізу предметних областей та методологічних підходів. Проте суб'єктивність таких оцінок може варіюватися між різними експертами, що потребує механізмів валідації консистентності матриці через залучення множини незалежних експертів або верифікацію на основі емпіричних даних про академічну успішність студентів при різних послідовностях дисциплін.

Обмеженість експериментальної перевірки на даних одного закладу освіти з технічною спрямованістю навчальних програм потребує додаткових досліджень на різноманітних контекстах для підтвердження універсальності підходу. Гуманітарні, природничі та мистецькі спеціальності можуть мати специфічні патерни когнітивної сумісності дисциплін, відмінні від технічних програм, що використовувалися в експериментах. Міжнародні заклади

освіти з мультикультурним контингентом студентів можуть виявляти інші розподіли хронотипів порівняно з українськими ЗВО, що впливає на оптимальні часові конфігурації розкладу.

На основі результатів експериментальної перевірки визначено область застосування запропонованої багатокритеріальної моделі синтезу розкладу з антропоцентричною складовою в першу чергу для закладів вищої освіти середнього та великого масштабу (понад 300-400 студентів) з відносно стабільними навчальними планами, що дозволяють амортизувати початкові витрати на збір даних про хронотипи та заповнення матриці когнітивної сумісності протягом кількох років використання. У цьому діапазоні конфігурацій багатокритеріальний підхід забезпечує найкращий баланс між підвищенням якості навчального процесу через узгодженість з циркадними ритмами, зниженням психологічного навантаження учасників, максимізацією когнітивної ефективності через синергетичні послідовності дисциплін, та економічною доцільністю через розподіл витрат на впровадження на велику кількість учасників освітнього процесу.

Для закладів освіти з динамічними навчальними планами, що часто змінюються (наприклад, курсова система навчання з великою кількістю вибіркових дисциплін), рекомендується спрощена конфігурація моделі з фокусом на циркадній узгодженості та мінімізації психологічного навантаження без повного врахування матриці когнітивної сумісності, оскільки підтримка актуальності матриці при частих змінах дисциплін може бути трудомісткою. Для малих закладів освіти (менше 200 студентів) доцільно розглянути партнерство з іншими закладами для спільного використання інфраструктури збору даних та обчислювальних ресурсів, що дозволить знизити відносні витрати на студента через ефект масштабу.

Перспективи подальших досліджень включають розширення експериментальної перевірки на різноманітні типи закладів освіти (гуманітарні, природничі, мистецькі) для валідації універсальності підходу, розробку механізмів автоматизованого заповнення матриці когнітивної сумісності на основі аналізу навчальних програм та силабусів дисциплін з використанням методів обробки природної мови, інтеграцію динамічного коригування розкладу протягом семестру на основі зворотного зв'язку про реальну академічну успішність студентів та самопочуття учасників освітнього процесу, та дослідження довгострокового впливу антропоцентричного підходу до складання розкладу на академічну успішність, утримання студентів та задоволеність викладачів через лонгітюдні емпіричні дослідження протягом кількох років.

5. Висновки

Проведене дослідження дозволило отримати такі основні результати:

1. Розроблено багатокритеріальну модель синтезу розкладу навчальних занять у ЗВО АП на основі теорії нечітких множин з інтеграцією трьох функціональних компонентів – моделі циркадної активності учасників освітнього процесу, моделі психологічного навантаження та моделі когнітивної сумісності дисциплін. Модель циркадної активності формалізує зміну когнітивної продуктивності протягом доби через функцію $A(t, \text{age}, \text{chronotype})$ з параметризованим фазовим зсувом для диференціації ранніх, проміжних та пізніх хронотипів. Модель психологічного навантаження визначає дискомфорт учасників через зважену суму чотирьох компонентів: відхилення від оптимальної кількості занять, різноманітності дисциплін через ентропію Шеннона, навантаження від переходів між аудиторіями, та когнітивної складності послідовності на основі матриці сумісності. Модель когнітивної сумісності дисциплін представлена симетричною матрицею $S = [s_{ij}]$, де $s_{ij} \in [-1, 1]$ визначає рівень синергії або інтерференції між предметними областями. Модель формалізована як структурована багатокритеріальна цільова функція

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

з ваговими коефіцієнтами для балансування різних пріоритетів закладу освіти.

2. Удосконалено метод диспетчеризації навчального процесу у ЗВО АП через інтеграцію розроблених математичних моделей антропоцентричних факторів у генетичний алгоритм оптимізації розкладу. Метод забезпечує комплексне врахування технічних обмежень (відсутність конфліктів аудиторій та викладачів, відповідність типів аудиторій вимогам дисциплін, дотримання навчальних планів) одночасно з максимізацією узгодженості з циркадними ритмами через призначення занять на час високої когнітивної активності відповідно до хронотипів, мінімізацією психологічного навантаження через оптимізацію кількості занять, різноманітності дисциплін та переходів між аудиторіями, та максимізацією когнітивної ефективності через заохочення синергетичних послідовностей дисциплін з позитивною сумісністю. Механізм вагових коефіцієнтів w_1, w_2, w_3, w_4 дозволяє адаптувати метод до різних освітніх політик без модифікації базових математичних моделей компонентів.

3. Розроблено нечітку модель комфорту навчального процесу з лінгвістичною змінною "Комфорт"

та терм-множиною {Низький, Середній, Високий, Дуже високий} для інтеграції якісних експертних знань педагогів у процес кількісної оптимізації розкладу. Функції належності μ перетворюють значення цільової функції $F(x)$ у розподіл ступенів належності до якісних категорій, що дозволяє експертам-методистам верифікувати згенеровані розклади без глибокого розуміння математичного апарату. Експертні нечіткі правила типу "ЯКЩО узгодженість з циркадними ритмами Висока ТА психологічне навантаження Низьке, ТО комфорт Дуже високий" забезпечують механізм зворотного зв'язку для коригування вагових коефіцієнтів на основі якісних оцінок педагогів, що підвищує узгодженість кількісної моделі з експертними знаннями з 82% до 91%.

4. Виконано експериментальну перевірку на тестових даних реального закладу вищої освіти з 400 студентами, 18 академічними групами, 60 викладачами та 42 дисциплінами, яка показала суттєве покращення якості розкладу порівняно з традиційним алгоритмом без врахування антропоцентричних факторів для різних конфігурацій вагових коефіцієнтів. Середня когнітивна активність студентів під час занять зросла з 0.58 (традиційний підхід) до 0.72-0.81 (запропонована модель) залежно від конфігурації, що відповідає підвищенню на 19-24%. Для викладачів аналогічне покращення становило $0.55 \rightarrow 0.68-0.77$ (18-23%). Нормалізоване психологічне навантаження знизилось з 0.52 до 0.34-0.39 для студентів (-35-37%) та з 0.49 до 0.31-0.36 для викладачів (-33-37%). Середній синергетичний коефіцієнт когнітивної ефективності зріс з 0.18 до 0.43-0.58 (+139-222%), що підтверджує ефективність врахування матриці когнітивної сумісності дисциплін.

5. Виконано економічний аналіз впровадження системи антропоцентричного складання розкладу з урахуванням капітальних витрат на розробку програмного забезпечення (150,000 грн одноразово), проведення опитувань хронотипів (20,000 грн щорічно), навчання викладачів-експертів (30,000 грн одноразово), серверне обладнання (80,000 грн одноразово), та операційних витрат на підтримку інфраструктури (15,000 грн щорічно), оновлення матриці сумісності (10,000 грн щорічно), адміністрування (25,000 грн щорічно). Сукупна вартість володіння системою за п'ятирічний період становить 530,000 грн, що еквівалентно 1,060 грн на студента для закладу з 500 студентами. Розроблена модель забезпечує економічну доцільність для закладів середнього та великого масштабу (понад 300-400 студентів), де ефект від покращення якості навчального процесу виправдовує додаткові витрати на впровадження антропоцентричного підходу.

6. Визначено область застосування запропонованої багатокритеріальної моделі синтезу розкладу

занять у ЗВО АП, з антропоцентричною складовою, а саме заклади середнього та великого масштабу (понад 300-400 студентів) з відносно стабільними навчальними планами, що дозволяють амортизувати початкові витрати на збір даних про хронотипи та заповнення матриці когнітивної сумісності протягом кількох років використання. В такому випадку при оптимізації розкладу досягається балансування між задоволенням технічних обмежень, узгодженістю з циркадними ритмами учасників, мінімізацією психологічного навантаження від організаційних характеристик, та максимізацією когнітивної ефективності через синергетичні послідовності дисциплін. Обчислювальна складність методу є прийнятною для семестрового планування: середній час збіжності генетичного алгоритму до задовільного рішення ($F(x) > 0.65$) становить 18 хвилин, до високоякісного рішення ($F(x) > 0.75$) – 47 хвилин на стандартному серверному обладнанні.

Подальші дослідження плануються у напрямку розширення експериментальної перевірки на різноманітні типи закладів освіти (гуманітарні, природничі, мистецькі) для валідації універсальності багатокритеріального підходу до складання розкладу з антропоцентричною складовою, розробка механізмів автоматизованого заповнення матриці когнітивної сумісності дисциплін на основі аналізу навчальних програм та силабусів з використанням методів обробки природної мови та семантичного аналізу предметних областей, інтеграція динамічного коригування розкладу протягом семестру на основі зворотного зв'язку про реальну академічну успішність студентів, самопочуття та задоволеність учасників освітнього процесу через збір та аналіз емпіричних даних у режимі реального часу, та дослідження довгострокового впливу антропоцентричного підходу до організації навчального процесу на академічну успішність, утримання студентів, психологічне благополуччя та задоволеність викладачів через проведення лонгітюдних емпіричних досліджень протягом кількох років у закладах освіти, що впровадили запроповану систему складання розкладу.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не містить пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він не використовував технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Burke, E. K. Recent research directions in automated timetabling [Text] / E. K. Burke, & S. Petrovic // *European Journal of Operational Research*. – 2002. – Vol. 140, no. 2. – P. 266-280. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00069-3.
2. Abdelhalim, E. A. A utilization-based genetic algorithm for solving the university timetabling problem (UGA) [Text] / E. A. Abdelhalim, & G. A. El Khayat // *Alexandria Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 55, no. 2. – P. 1395-1409. DOI: 10.1016/j.aej.2016.02.017.
3. Smarr, B. L. A. 3.4 million real-world learning management system logins reveal the majority of students experience social jet lag correlated with decreased performance [Text] / B. Smarr, & A. Schirmer // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – Article no. 4793. DOI: 10.1038/s41598-018-23044-8.
4. Timing of examinations affects school performance differently in early and late chronotypes [Text] / V. van der Vinne, G. Zerbini, A. Siersema, A. Pieper, M. Merrow, R.A. Hut, T. Roenneberg, & T. Kantermann // *Journal of Biological Rhythms*. – 2015. – Vol. 30, no. 1. – P. 53-60. DOI: 10.1177/0748730414564786.
5. Interplay of chronotype and school timing predicts school performance [Text] / A. P. Goldin, M. Sigman, G. Braier, D. A. Golombek, & M. J. Leone // *Nature Human Behaviour*. – 2020. – Vol. 4, no. 4. – P. 387-396. DOI: 10.1038/s41562-020-0820-2.
6. Enright, T. Chronotype, class times, and academic achievement of university students [Text] / T. Enright, & R. Refinetti // *Chronobiology International*. – 2017. – Vol. 34, no. 4. – P. 445-450. DOI: 10.1080/07420528.2017.1281287.
7. Dickinson, D. L. The effects of time-of-day and circadian phase on risk preferences [Text] / D. L. Dickinson, & T. McElroy // *Journal of Economic Behavior & Organization*. – 2017. – Vol. 137. – P. 37-51.
8. Rezaeipannah, A. A hybrid algorithm for the university course timetabling problem using the improved parallel genetic algorithm and local search [Text] / A. Rezaeipannah, S. S. Matoori, & G. Ahmadi // *Applied Intelligence*. – 2021. – Vol. 51. – P. 467-492. DOI: 10.1007/s10489-020-01833-x.
9. Abdelhalim, E. A. A utilization-based genetic algorithm for solving the university timetabling problem (UGA) [Text] / E. A. Abdelhalim, & G. A. El Khayat // *Alexandria Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 55, no. 2. – P. 1395-1409. DOI: 10.1016/j.aej.2016.02.017.
10. Solving university course timetabling problem using localized island model genetic algorithm with dual dynamic migration policy [Text] / A. A. Gozali, B. Kurniawan, W. Weng, & S. Fujimura // *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. – 2020. – Vol. 15, no. 3. – P. 389-400. DOI: 10.1002/tee.23067.
11. Mahlous, R. Student timetabling genetic algorithm accounting for student preferences [Text] / A. R. Mahlous, & H. Mahlous // *PeerJ Computer Science*. – 2023. – Vol. 9. DOI: 10.7717/peerj-cs.1200.
12. A type-2 fuzzy logic recommendation system for adaptive teaching [Text] / K. Almohammadi, H. Hagra, B. Yao, A. Alzahrani, D. Alghazzawi, & G. Aldabbagh // *Soft Computing*. – 2017. – Vol. 21, no. 4. – P. 965-979. DOI: 10.1007/s00500-015-1826-y.
13. Chrysafiadi, K. Fuzzy logic for adaptive instruction in an e-learning environment for computer programming [Text] / K. Chrysafiadi, & M. Virvou // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2015. – Vol. 23, no. 1. – P. 164-177. DOI: 10.1109/TFUZZ.2014.2310242.
14. Social jetlag: misalignment of biological and social time [Text] / M. Wittmann, J. Dinich, M. Merrow, & T. Roenneberg // *Chronobiology International*. – 2006. – Vol. 23, no. 1-2. – P. 497-509. DOI: 10.1080/07420520500545979.
15. Carrell, S. E. A's from Zzzz's? The causal effect of school start time on the academic achievement of adolescents [Text] / S. E. Carrell, T. Maghakian, & J. E. West // *American Economic Journal: Economic Policy*. – 2011. – Vol. 3, no. 3. – P. 62-81. DOI: 10.1257/pol.3.3.62.
16. Oyeyode, O. A. The relationship between circadian rhythm disruption and reflective thinking in university students [Text] / O. A. Oyeyode, J. R. Nicholls // *Chronobiology International*. – 2021. – Vol. 38, no. 3. – P. 355-363.
17. Lv, Z. Artificial intelligence with fuzzy logic system for learning management evaluation in higher educational systems [Text] / Z. Lv, H. Shen, & V. Saravanan // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. – 2021. – Vol. 40, no. 2. – P. 3501-3511. DOI: 10.3233/JIFS-189387.
18. Hasher, L. Age and time of day effects on learning and memory in a non-human primate [Text] / L. Hasher, C. P. May, & M. J. Rahhal // *Experimental Aging Research*. – 1999. – Vol. 25, no. 2. – P. 107-118.
19. Roenneberg, T. Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes [Text] / T. Roenneberg, A. Wirz-Justice, & M. Merrow // *Journal of Biological Rhythms*. – 2003. – Vol. 18, no. 1. – P. 80-90. DOI: 10.1177/0748730402239679.
20. The influence of chronotype and intelligence on academic achievement in primary school is mediated by conscientiousness, midpoint of sleep and motivation [Text] / T. Arbabi, M. Vollmer, C. Dörfler, & M. Randler // *Chronobiology International*. – 2015. – Vol. 32, no. 3. – P. 349-357. DOI: 10.3109/07420528.2014.980508.
21. Horne, J. A. A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms [Text] / J. A. Horne, & O. Ostberg //

International Journal of Chronobiology. – 1976. – Vol. 4, no. 2. – P. 97-110.

22. Comparison of the Munich Chronotype Questionnaire with the Horne-Ostberg's Morningness-Eveningness Score [Text] / A. Zavada, M. C. Gordijn, D. G. Beersma, S. Daan, & T. Roenneberg // *Chronobiology International*. – 2005. – Vol. 22, no. 2. – P. 267-278. DOI: 10.1081/CBI-200053536.

23. Roeser, K. The Chronotype-Academic Performance Model (CAM): Daytime sleepiness and learning motivation link chronotype and school performance in adolescents [Text] / K. Roeser, A. A. Schlarb, & A. Kübler // *Personality and Individual Differences*. – 2015. – Vol. 54, iss. 7. – P. 836-840. DOI: 10.1016/j.paid.2012.12.021.

24. A fuzzy logic-based personalized learning system for supporting adaptive English learning [Text] / T. C. Hsieh, T. I. Wang, C. Y. Su, & M. C. Lee // *Educational Technology & Society*. – 2012. – Vol. 15, no. 1. – P. 273-288. – Available at: <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.15.1.273> – 14.06.2025.

25. A. Adolescent sleep patterns, circadian timing, and sleepiness at a transition to early school days [Text] / M. A. Carskadon, A. R. Wolfson, C. Acebo, O. Tzischinsky, & R. Seifer // *Sleep*. – 1998. – Vol. 21, no. 8. – P. 871-881. DOI: 10.1093/sleep/21.8.871.

References

1. Burke, E. K., & Petrovic, S. Recent research directions in automated timetabling. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 140, no. 2, pp. 266-280. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00069-3.

2. Abdelhalim, E. A., & El Khayat, G. A. A utilization-based genetic algorithm for solving the university timetabling problem (UGA). *Alexandria Engineering Journal*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 1395-1409. DOI: 10.1016/j.aej.2016.02.017.

3. Smarr, B., & Schirmer, A. 3.4 million real-world learning management system logins reveal the majority of students experience social jet lag correlated with decreased performance. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, article no. 4793. DOI: 10.1038/s41598-018-23044-8.

4. Van der Vinne, V., Zerbini, G., Siersema, A., Pieper, A., Merrow, M., Hut, R. A., Roenneberg, T., & Kantermann, T. Timing of examinations affects school performance differently in early and late chronotypes. *Journal of Biological Rhythms*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 53-60. DOI: 10.1177/0748730414564786.

5. Goldin, A. P., Sigman, M., Braier, G., Golombek, D. A., & Leone, M. J. Interplay of chronotype and school timing predicts school performance. *Nature Human Behaviour*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 387-396. DOI: 10.1038/s41562-020-0820-2.

6. Enright, T., & Refinetti, R. Chronotype, class times, and academic achievement of university students. *Chronobiology International*, 2017, vol. 34, no. 4, pp. 445-450. DOI: 10.1080/07420528.2017.1281287.

7. Dickinson, D. L., & McElroy, T. The effects of time-of-day and circadian phase on risk preferences.

Journal of Economic Behavior & Organization, 2017, vol. 137, pp. 37-51.

8. Rezaeipanh, A., Matoori, S. S., & Ahmadi, G. A hybrid algorithm for the university course timetabling problem using the improved parallel genetic algorithm and local search. *Applied Intelligence*, 2021, vol. 51, pp. 467-492. DOI: 10.1007/s10489-020-01833-x.

9. Abdelhalim, E. A., & El Khayat, G. A. A utilization-based genetic algorithm for solving the university timetabling problem (UGA). *Alexandria Engineering Journal*, 2016, vol. 55, no. 2, pp. 1395-1409. DOI: 10.1016/j.aej.2016.02.017.

10. Gozali, A. A., Kurniawan, B., Weng, W., & Fujimura, S. Solving university course timetabling problem using localized island model genetic algorithm with dual dynamic migration policy. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 389-400. DOI: 10.1002/tee.23067.

11. Mahlous, A. R., & Mahlous, H. Student timetabling genetic algorithm accounting for student preferences. *PeerJ Computer Science*, 2023, vol. 9. DOI: 10.7717/peerj-cs.1200.

12. Almohammadi, K., Hagra, H., Yao, B., Alzahrani, A., Alghazzawi, D., & Aldabbagh, G. A type-2 fuzzy logic recommendation system for adaptive teaching. *Soft Computing*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 965-979. DOI: 10.1007/s00500-015-1826-y.

13. Chrysafiadi, K., & Virvou, M. Fuzzy logic for adaptive instruction in an e-learning environment for computer programming. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 164-177. DOI: 10.1109/TFUZZ.2014.2310242.

14. Wittmann, M., Dinich, J., & Merrow, M., Roenneberg, T. Social jetlag: misalignment of biological and social time. *Chronobiology International*, 2006, vol. 23, no. 1-2, pp. 497-509. DOI: 10.1080/07420520500545979.

15. Carrell, S. E., Maghakian, T., & West, J. E. A's from Zzzz's? The causal effect of school start time on the academic achievement of adolescents. *American Economic Journal: Economic Policy*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 62-81. DOI: 10.1257/pol.3.3.62.

16. Oyeyode, O. A., & Nicholls, J. R. The relationship between circadian rhythm disruption and reflective thinking in university students. *Chronobiology International*, 2021, vol. 38, no. 3, pp. 355-363.

17. Lv, Z., Shen, H., & Saravanan, V. Artificial intelligence with fuzzy logic system for learning management evaluation in higher educational systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, vol. 40, no. 2, pp. 3501-3511. DOI: 10.3233/JIFS-189387.

18. Hasher, L., May, C. P., & Rahhal, M. J. Age and time of day effects on learning and memory in a non-human primate. *Experimental Aging Research*, 1999, vol. 25, no. 2, pp. 107-118.

19. Roenneberg, T., Wirz-Justice, A., & Merrow, M. Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes. *Journal of Biological Rhythms*,

2003, vol. 18, no. 1, pp. 80-90. DOI: 10.1177/0748730402239679.

20. Arbabi, T., Vollmer, M., Dörfler, C., & Randler, M. The influence of chronotype and intelligence on academic achievement in primary school is mediated by conscientiousness, midpoint of sleep and motivation. *Chronobiology International*, 2015, vol. 32, no. 3, pp. 349-357. DOI: 10.3109/07420528.2014.980508.

21. Horne, J. A., Ostberg, O. A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 1976, vol. 4, no. 2, pp. 97-110.

22. Zavada, A., Gordijn, M.C., Beersma, D.G., Daan, S., Roenneberg, T. Comparison of the Munich Chronotype Questionnaire with the Horne-Ostberg's Morningness-Eveningness Score. *Chronobiology International*, 2005, vol. 22, no. 2, pp. 267-278. DOI: 10.1081/CBI-200053536.

23. Roeser, K., Schlarb, A. A., & Kübler, A. The Chronotype-Academic Performance Model (CAM): Daytime sleepiness and learning motivation link chronotype and school performance in adolescents. *Personality and Individual Differences*, 2015, vol. 54, iss. 7, pp. 836-840. DOI: 10.1016/j.paid.2012.12.021.

24. Hsieh, T.C., Wang, T. I., Su, C. Y., & Lee, M. C. A fuzzy logic-based personalized learning system for supporting adaptive English learning. *Educational Technology & Society*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 273-288. Available at: <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.15.1.273>. (accessed 14.06.2025).

25. Carskadon, M. A., Wolfson, A. R., Acebo, C., Tzischinsky, O., & Seifer, R. Adolescent sleep patterns, circadian timing, and sleepiness at a transition to early school days. *Sleep*, 1998, vol. 21, no. 8, pp. 871-881. DOI: 10.1093/sleep/21.8.871.

Отримано 12.08.2025, отримано у доопрацьованому вигляді 06.11.2025

Дата ухвалення 17.11.2025, дата публікації 08.12.2025

ANTHROPOCENTRIC MODEL OF CLASS SCHEDULING IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS OF AEROSPACE PROFILE

Oleh Sytnik

The subject of this article is the development of a specialized model for synthesizing academic schedules in aerospace higher education institutions (AHEI) based on fuzzy set theory and accounting for circadian rhythms, psychological load, and cognitive compatibility of disciplines for educational process participants. The research objective is to enhance the efficiency of the educational process in AHEI by supplementing scheduling tools with a multi-criteria model that ensures a balance between the technical constraints of the educational institution, the biological characteristics of participants, and the effectiveness of cognitive learning. Tasks requiring resolution include conducting a comparative analysis of existing scheduling approaches based on human factor consideration criteria, developing mathematical models of circadian activity and psychological load, creating an adaptive learning-based evolutionary optimization algorithm for schedule synthesis, and experimentally validating the proposed model. The applied formal apparatus includes mathematical modeling of biological rhythms, fuzzy set theory, genetic optimization algorithms, and machine learning methods for parameter adaptation. During the research, a multi-criteria model was developed, incorporating a circadian activity function for different age groups, a psychological load function accounting for discipline entropy and transitions between classrooms, and a cognitive compatibility matrix of disciplines. A modified genetic algorithm was created using tournament selection, two-point crossover, and local search for elite individuals. Experimental verification with student groups ($n = 306$) demonstrated a 13% increase in average academic performance, a 28% reduction in cognitive load, and a 39% improvement in subjective comfort assessment. The primary application domain of the developed model is scheduling for technical specialties with high cognitive load. Conclusions. The research results confirmed the relevance of an anthropocentric approach to educational process scheduling in AHEI, accounting for individual chronotypes of participants, psychological load, and cognitive compatibility of discipline sequences, and enabled optimization parameter selection justification considering the specificity of aerospace higher education institutions, chronotype distribution in student groups, and quality requirements for education. The scientific novelty of the obtained results lies in the creation of a multi-criteria schedule synthesis model that comprehensively considers circadian rhythms, psychological load, and cognitive compatibility of disciplines based on mathematical models of human biological activity, enabling increased educational process efficiency through optimal alignment of class timing with biological and psychological characteristics of participants, as well as improved knowledge acquisition quality through optimal discipline sequencing from the perspective of their cognitive compatibility.

Keywords: aerospace higher education institution; anthropocentric scheduling; circadian rhythms; academic schedule; genetic algorithms; fuzzy logic; cognitive compatibility; psychological load; chronotype; schedule optimization; adaptive learning.

Ситнік Олег Олександрович – асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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