

А. І. МАЛЮГА

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

**МЕТОДИ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
НАВЧАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Предметом статті є методична база забезпечення адаптивності навчальних систем (НС), з біометричним зворотним зв'язком із користувачем у реальному часі, що забезпечує персоніфікацію процесу навчання. Метою є підвищення ефективності комп'ютерних засобів навчання, шляхом розроблення методів формування профілю користувача НС на основі інтеграції попередніх психометричних оцінок рівня підготовки, аналізу результатів навчання та подальшої конвертації інформації щодо стану користувача у дискретні рівні складності для диспетчеризації навчальних модулів у складі НС. Завдання, що потребують вирішення: провести критичний аналіз підходів до створення адаптивних НС з біометричним зворотним зв'язком та засобами персоніфікації процесу навчання; розробити метод формування індивідуального профілю користувача НС, що забезпечить раціональну траєкторію навчання, завдяки врахуванню особливостей процесу набуття знань, вмінь та навичок, притаманних кожній окремій особі, яка навчається; розробити метод оцінювання поточного стану користувача НС в режимі реального часу, на основі даних, що надходять з мобільних сенсорів, врахувавши при цьому існуючі експлуатаційні та вартісні обмеження пристроїв біометричного моніторингу. Були отримані наступні результати. Запропоновано метод автоматизованого формування профілю користувача навчальної програмної системи шляхом оцінки латентних здібностей користувача, з використанням психометричних моделей, визначення на цій основі рівнів складності тестових завдань, опису типових помилок і формування вектору індивідуального профілю користувача НС, та метод онлайн-оцінки поточного психофізичного стану користувача. Практична перевага розроблених методів полягає у забезпеченні інтеграції компоненти оцінки стану у програмні архітектури адаптивних НС в різних предметних галузях, на основі стандартизованого представлення вектору поточного стану користувача. Така інтеграція може бути виконана у режимі *soft real-time* в системах навчання водінню у віртуальній реальності, тренажерах для підготовки пілотів з можливостями моніторингу когнітивного навантаження у критичних польотних ситуаціях, у навчальних платформах з моніторингом уваги та швидкості реакції для операторів, що контролюють складне обладнання (наприклад, енергоблоки атомних електростанцій), тренінгових системах для підтримки управлінських компетенцій, тощо. Висновки. В результаті проведеного дослідження створено підхід до забезпечення належного рівню адаптивності НС, шляхом послідовного застосування в процесі навчання методів персоніфікації користувача, а саме формування його індивідуального профілю, й моніторингу поточного психофізичного стану в он-лайн режимі. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому. Вперше запропоновано метод автоматизованого формування профілю користувача навчальної програмної системи шляхом оцінки латентних здібностей користувача з використанням психометричних моделей, визначення на цій основі рівнів складності задач для користувача, опису типових помилок і формування вектору профілю користувача як формальної специфікації інтерфейсу з користувачем, що дає можливість автоматизувати процес диспетчеризації та верифікації програмних модулів НС, в залежності від значень компонентів вектору індивідуального профілю користувача. Удосконалено метод онлайн-оцінки стану користувача в режимі реального часу для адаптивних НС, в якому, на відміну від існуючих, формується інтегральний біометричний індекс на основі аналізу варіабельності серцевого ритму, визначаються патерни серцевого ритму та в результаті, формується вектор поточного стану користувача, який може бути представлений в рамках програмного інтерфейсу для автоматизованої диспетчеризації програмних модулів НС. Результати експериментальної перевірки засвідчили дієвість розроблених методичних засобів при вирішенні задач, що пов'язані із підвищенням ефективності функціонування НС.

Ключові слова: навчальна система; адаптивність; психометричні характеристики користувача; біометричний зворотний зв'язок; когнітивне навантаження; Computerized Adaptive Testing; Item Response Theory; Maximum Likelihood Estimation; рівень складності тестового завдання; траєкторія зміни навичок, латентні здібності користувача.



1. Вступ

Останніми роками в країнах із розвинутою ІТ-індустрією, зокрема, і в Україні, розробники програмного забезпечення значну увагу приділяють створенню навчальних систем (НС). Ці системи призначені для забезпечення ефективності процесу набуття знань, вмінь та навичок операторами складної техніки, як ось водіями, пілоти, диспетчерами руху та іншими фахівцями, професійна діяльність яких пов'язана із необхідністю оперативного формування і прийняття відповідальних рішень в екстремальних умовах. Розроблення НС породжує низку проблем, що обумовлені, насамперед, необхідністю організації адаптивного навчання користувачів із різними когнітивними здібностями, освітнім досвідом та динамікою засвоєння навчального матеріалу. Існуючі НС, в основу побудови яких покладено традиційні для програмної інженерії підходи, в рамках яких використовується статична модель користувача, не в змозі враховувати індивідуальні траєкторії розвитку компетенцій при навчанні і забезпечити персоналізацію навчального процесу в режимі реального часу. Це призводить до виникнення надмірної функціональності і, відповідно, складності навчальних модулів для початківців або недостатньої складності для просунутих користувачів й подальшого некоректного підбору навчальних сценаріїв, оскільки вони не враховують індивідуальні патерни помилок користувачів. В результаті, традиційні архітектурні рішення для НС мають ряд недоліків, зокрема:

- обмежені можливості математичного забезпечення програмних компонент для автоматизованої оцінки рівня підготовки користувача, що приводить до використання механізмів категоризації користувачів за кількістю виконаних завдань без урахування складності завдань, патернів помилок та поточних психометричних характеристик користувача;

- недостатню інтеграцію психолого-педагогічних моделей у програмні архітектури НС для побудови програмних модулів із чітко специфікованими інтерфейсами, вхідними параметрами та вихідними даними, що ускладнює розробку, тестування та валідацію таких систем;

- відсутність методів автоматизованої конвертації результатів психометричної оцінки користувача у дискретні рівні складності навчальних модулів, що обмежує можливості диспетчеризації навчальних компонент у гібридних програмних архітектурах.

Таким чином, проблематика формування профілю користувача у НС безпосередньо пов'язана з вирішенням таких задач програмної інженерії, як розробка архітектурних патернів для забезпечення

адаптивності систем, моделювання поведінки користувача як вхідного параметру для диспетчеризації програмних модулів, формалізація вимог до компонент оцінки стану користувача, враховуючи специфікацію інтерфейсів та протоколів взаємодії між модулями, а також верифікації коректності алгоритмів адаптації шляхом порівняння поведінки системи, запланованої з використанням формальних правил вибору навчальних модулів, а також фактичної поведінки програмної системи. Супутньою проблемою створення ефективних НС виступає вірогідність виникнення у користувача когнітивного перевантаження, внаслідок некоректного підбору складності навчального сценарію та недостатньої психологічної підготовки до реальних ситуацій.

В силу зазначених вище обставин, розробка методів формування профілю користувача створює умови для задоволення нефункціональних вимог щодо латентності, точності класифікації та охоплення користувачів із різними психофізіологічними характеристиками.

1.1. Мотивація дослідження

В дослідженнях [1, 2] запропоновано трикомпонентну модель, а також метод оцінки рівня підготовки осіб, які навчаються на основі обробки даних щодо вирішення цими особами завдань в минулому. Проте, задача імплементації даного підходу у програмні модулі, що входять до складу адаптивних НС із розподіленою архітектурою в даних роботах не розглядається. Роботи [3, 4] присвячені адаптації НС для навчання водіїв автотранспортної техніки, із використанням біометричних даних. Проте, розроблені на такий методичний основі системи вони не враховують попередню підготовку користувачів НС, що є важливим для персоналізації базового рівня складності навчальних модулів, до початку адаптації, на основі біометричних даних.

Таким чином, в рамках інженерії програмного забезпечення виникає задача побудови методу формування профілю користувача навчальної системи з тим, щоб забезпечити можливість інтеграції компоненти профілю користувача у програмні архітектури навчальних систем різних предметних галузей. Друге завдання, щодо надання адаптивності НС, передбачає доповнення програмного забезпечення таких систем засобами оцінювання поточного стану користувача, що, по суті, є реалізацією другої фази персоналізації адаптивних НС і полягає у доповненні профілю користувача релевантною інформацією про поточний стан цієї особи. Необхідність реалізації зазначеного завдання обумовлена тим, що профіль користувача НС формується на основі аналізу виконання навчальних завдань, але він при цьому не

враховує змін поточного психофізіологічного стану користувача під час безперервної взаємодії з програмною системою, включаючи когнітивне перевантаження, стрес, втому, зниження концентрації уваги. Ці фактори можуть суттєво знизити ефективність засвоєння навчального матеріалу навіть при підібраному відповідно до профілю користувача базовому рівні складності навчальних модулів [3, 5].

1.2. Огляд літератури

Процес оцінювання стану і формування профілю користувача НС може бути відтворено на основі психометричної теорії оцінки результатів виконання завдання, що встановлює формальну залежність між здібностями користувача, параметрами завдання та ймовірністю його правильного виконання користувачем. Дана теорія інтегрує три класичні підходи до оцінки здібностей осіб, які навчаються – використання тестів фіксованої довжини (fixed-length testing), аналіз за шкалами (або шкальний аналіз) та стандартні опитувальники.

Підхід до оцінки з використанням тестів фіксованої довжини передбачає, що всі учні отримують однаковий набір питань незалежно від їхнього рівня підготовки. Наприклад, у стандартизованому тесті з 50 питань учень-початківець і учень високого рівня виконують абсолютно ідентичні завдання. Основний недолік такого підходу полягає у неефективному використанні часу: «слабкі» учні витрачають багато часу на занадто складні питання, які не відповідають їхньому рівню розуміння, тоді як «сильні» учні змушені виконувати прості завдання, які не несуть для них діагностичної цінності [5]. Це призводить до того, що тест добре працює лише для учнів середнього рівня.

Аналіз за шкалами ґрунтується на припущенні, що завдання можна впорядкувати від простих до складних, і успішне виконання складнішого завдання автоматично означає здатність виконати всі простіші. Такий підхід часто використовується у поетапному навчанні, де кожен рівень складності будується на попередньому. Проте, головним обмеженням даного підходу є жорстка ієрархічна структура тестів, яка не враховує комплексність навичок учнів [6]. Наприклад, учень може добре виконувати практичні завдання високого рівня, але мати прогалини в теоретичних знаннях середнього рівня. Аналіз за шкалами також не передбачає групування завдань за «роздільною здатністю», тобто такі завдання не дають можливість відрізнити учнів з близькими рівнями навичок [7].

Стандартні опитувальники зазвичай містять серію питань із заздалегідь визначеними варіантами відповідей (множинний вибір, шкала Лайкерта то-

що), які оцінюють знання або навички учня на основі його звіту за визначеними критеріями. Такі інструменти легко використовувати та стандартизувати, що обумовлює їх широке використання для масових оцінок. Однак ключовий недолік даного підходу полягає у відсутності адаптивності: опитувальник не змінює складність або спрямованість питань в залежності від попередніх відповідей учня [8]. Така властивість означає, що для досягнення оцінки прийнятної точності в опитувальник необхідно включати велику кількість питань. Збільшення набору питань суттєво подовжує час тестування і зменшує мотивацію учнів. Крім того, стандартні опитувальники часто не враховують додаткові фактори, які виникають у процесі навчання, наприклад когнітивне перевантаження, поточний емоційний стан учня тощо. Ці фактори можуть суттєво впливати на результати опитування.

Наведені обмеження класичних методів свідчать про необхідність переходу до адаптивних систем оцінювання. Останні повинні забезпечувати в процесі навчання оперативне коригування складності і призначення завдань на основі поточного рівня учня, забезпечуючи водночас підвищення якості навчання і зменшення витрат часу [6, 8].

Існуючі програмні рішення для моніторингу стану користувача в навчальних системах мають ряд обмежень щодо адаптації функцій таких систем. [3, 4,]. По-перше, складність інтеграції у програмні архітектури навчальних систем методів біометричного моніторингу, реалізованих як самостійні компоненти із специфікованими інтерфейсами, що використовують біометричні дані зі встановлених на тілі особи, яка навчається, сенсорів, та формують на основі алгоритмів фільтрації і класифікації вихідний вектор поточного стану. Дане обмеження призводить до використання на практиці евристичних правил із статичними порогами, урахування динаміки знань та вмінь користувача, зміни стану у часі та контекстуальних факторів. Наприклад, частота серцевих скорочень вище певного порогового значення може бути інтерпретована як відображення стресового стану користувача, хоча така підвищена частота може бути наслідком фізичного навантаження а не стресу.

Зокрема, у НС з підготовки водіїв некоректна оцінка поточного стану користувача при когнітивному перевантаженні останнього може призвести до підвищення ризику помилок у симульованих дорожніх ситуаціях, кіберхвороби, яка приводить до дезорієнтації та зорової втоми серед значної частини користувачів, та недостатньої підготовки до реальних дорожніх ситуацій через відсутність персоналізованого навантаження [4, 5]. По-друге, відсутність формально визначених програмних інтерфейсів для

інтеграції компонент оцінки стану в режимі реального часу та модулів диспетчеризації навчальних ресурсів і верифікації процесу навчання обмежує можливості побудови адаптивних архітектур із двофазною моделлю персоналізації на основі оцінки профілю та поточного стану користувача.

Проблематика оцінки стану користувача в режимі реального часу пов'язана з розробкою архітектурних патернів для адаптивних систем реального часу, інтеграцією зовнішніх сенсорів (розташованих на тілі особи, яка навчається, пристроїв) у програмні архітектури через стандартизовані бездротові протоколи передачі даних з низьким енергоспоживанням та моделюванням змін стану підготовки користувача як вхідного параметру для диспетчеризації програмних модулів під час виконання.

Виконаний аналіз літературних джерел щодо розробки програмного забезпечення для адаптивних навчальних систем показав, що побудові комплексних архітектурних рішень, які інтегрують біометричний моніторинг (зокрема, на основі аналізу варіабельності серцевого ритму) у програмні компоненти з специфікаціями програмного інтерфейсу на основі вектору стану користувача для диспетчеризації модулів під час виконання, не приділяється достатньо уваги [3, 9]. Зокрема, у дослідженні [3] описано процес адаптації на основі правил із статичними порогами для частоти серцевих скорочень, проте, такий підхід не враховує розвиток навичок користувача, зміни його стану у часі та контекстуальні фактори, що призводить до обмеженої точності класифікації. В роботі [4] описано формальні методи адаптації на основі електроенцефалографічного моніторингу лобного співвідношення тета/альфа хвиль для класифікації когнітивного навантаження з високою точністю. Однак реалізація на практиці такого роду класифікації потребує використання вартісного багатоканального шолому для електроенцефалографії та й сама така процедура характеризується значною затримкою при зборі й обробці сигналу.

Відсутність математичного забезпечення для компонент оцінки стану користувача в режимі реального часу може призвести до помилок проектування програмної системи, пов'язаних із відсутністю адаптивності системи при невідповідності складності навчальних модулів і поточного стану користувача в ситуації когнітивного перевантаження. Дане перевантаження в навчальних середовищах віртуальної реальності приводить до таких негативних ефектів як кіберхвороба та суттєве зниження результатів навчання [4, 9].

Дослідження можливостей використання варіабельності серцевого ритму як індикатора когнітивного навантаження в освітніх системах підтверджують кореляцію серцевого ритму з когнітивним нава-

нтаженням, проте імплементації даного підходу в рамках програмних архітектур не приділяється достатньо уваги [5, 9].

Виконаний аналіз літературних джерел показав відсутність комплексних архітектурних рішень для навчальних систем, що інтегрують психометричні моделі оцінки користувачів у програмні компоненти з формалізованими специфікаціями вхідних (вихідних) даних, невисокою алгоритмічною складністю обчислень з можливістю валідації отриманої оцінки рівня підготовки користувача через порівняння з експертними оцінками інструкторів.

Таким чином, задача персоніфікації при розробці адаптивних НС, що передбачає створення спочатку індивідуального профілю користувача, а згодом, в процесі експлуатації, оцінювання поточного стану користувача НС в режимі реального часу за допомогою мобільних сенсорів доступної вартості, та представлення поточного стану користувача у формальному вигляді для побудови міжмодульних інтерфейсів, потребує свого вирішення.

1.3. Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є підвищення ефективності комп'ютерних засобів навчання, шляхом розроблення методів формування профілю користувача НС на основі інтеграції попередніх психометричних оцінок рівня підготовки користувачів, аналізу результатів навчання та подальшої конвертації інформації щодо стану користувача у дискретні рівні складності для диспетчеризації навчальних модулів у гібридній програмній архітектурі. Зазначені методи мають забезпечити формування вектору профілю користувача та ідентифікації його поточного стану як формалізованого програмного інтерфейсу для взаємодії з компонентами адаптивного підключення модулів НС та контекстно-залежної верифікації з використанням методів інтелектуального аналізу процесів навчання, що відповідає принципам модульності, слабкої зв'язності між компонентами та сильного зчеплення всередині модулів при проектуванні програмних архітектур [10]. При цьому оцінювання стану користувача НС повинно здійснюватися в онлайн-режимі, на основі інтеграції неінвазивного біометричного моніторингу через мобільний сенсор для формування вектору поточного стану як формалізованого програмного інтерфейсу при взаємодії з компонентами адаптивного підключення модулів та самоадаптивної верифікації через процесний аналіз.

Для досягнення заявленої мети, на початку дослідження було сформульовано низку таких задач:

- 1) провести критичний аналіз підходів до створення адаптивних НС з біометричним зворот-

ним зв'язком та засобами персоніфікації процесу навчання. Аналіз має на меті виявити недоліки існуючих підходів та обґрунтувати необхідність розроблення спеціальних методичних засобів;

2) розробити метод формування індивідуального профілю користувача НС, що забезпечить раціональну траєкторію навчання, завдяки врахуванню особливостей процесу набуття знань, вмінь та навичок, притаманних кожній окремій особі, яка навчається;

3) розробити метод оцінювання поточного стану користувача НС в режимі реального часу, на основі даних, що надходять з мобільних сенсорів, врахувавши при цьому існуючі експлуатаційні та вартісні обмеження пристроїв біометричного моніторингу.

Стаття структурована наступним чином. Розділ 1 містить результати критичного огляду публікацій, в яких запропоновано шляхи підвищення ефективності функціонування НС, в аспекті персоніфікації процесу навчання. У розділі 2 описано метод формування індивідуального профілю користувача НС. У розділі 3 подано опис методу оцінювання поточного стану користувача НС в режимі реального часу, за допомогою мобільних сенсорів. У четвертому розділі представлені результати експериментальної перевірки дієвості методичних засобів, що були створені у ході дослідження. Розділ 5 присвячено обговоренню отриманих результатів, їх порівнянню з альтернативними підходами. У розділі 6 підсумовуються результати роботи, сформульовано висновки та представлено напрямки подальших досліджень.

2. Метод формування індивідуального профілю користувача в адаптивних НС

Розроблений метод використовує концепцію комп'ютеризованого адаптивного тестування (Computerized Adaptive Testing, або скорочено «САТ»), що поєднує теорію ймовірностей і адаптивність [2, 11]. САТ використовує базові ідеї тестування пацієнта у лікаря: якщо пацієнт легко виконав базові тести руху, то лікар одразу переходить до більш складних вправ, достроково завершуючи перевірку базових навичок. Концепція комп'ютеризованого адаптивного тестування полягає в тому, що вибір наступного питання має залежати від того, чи правильно учень відповів на попереднє. Якщо відповідь учня правильна, то система тестування пропонує вирішити складніше завдання, в іншому випадку надає простіший тест [6]. Такий підхід дає можливість більш точно оцінити здібності учня з використанням суттєво меншої кількості питань у

порівнянні з тестами фіксованої довжини. Дана концепція реалізується в рамках теорії відгуку на завдання (Item Response Theory, або IRT). Остання трактує ймовірність успішного проходження поточного навчального епізоду як функцію від здібностей учня та параметрів кожного завдання, що визначає взаємодію між характеристиками особи та характеристиками завдання [6]. Зазначений підхід надає змогу передбачити ймовірність успіху в конкретній навчальній ситуації.

Функція адаптивної взаємодії спирається на спеціальну модель [12], яка трансформує безперервну вхідну змінну у значення ймовірності. Згідно цієї моделі, ймовірність $P(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true})$ правильної відповіді учня зі здібностями b_j на завдання зі складністю a_i визначається різницею між його здібностями та складністю завдання. Латентна здібність користувача b_j зазвичай представляється як безрозмірна величина у діапазоні $[-3; 3]$, де нульове значення відповідає середньому рівню підготовки. Складність завдання a_i має таку саму шкалу, що й здібності. Тобто складність $a_i = 1$ означає, що для розв'язання завдання учень повинен мати здібності $b_j = 1$. Якщо здібності учня значно перевищують складність завдання, то ймовірність коректної відповіді наближається до 1, в протилежному ж випадку – до 0. Тобто, ця залежність є нелінійною і формалізується за допомогою логістичної функції або сигмоїди:

$$P(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true}) = \frac{1}{1 + e^{-(a_i - b_j)}}. \quad (1)$$

Однак модель оцінки ймовірності правильної відповіді (1) не враховує, що деякі сценарії завдань краще розділяють слабких та сильних учнів, ніж інші. Наприклад, при навчанні водінню маневр «паралельне паркування» чітко розділяє новачків і досвідчених водіїв, а завдання «рух по прямій дорозі» виконують успішно майже всі курсанти автошколи, незалежно від рівня їх майстерності.

Цей недолік враховано в моделі [7], у який введено спеціальний параметр розрізнення c_i , що визначає чутливість завдання до рівня здібностей через крутизну логістичної кривої, а також параметр вгадування d_i , що задає мінімально можливе значення ймовірності. Високе значення параметру дискримінації c_i означає, що навіть невелика зміна в здібностях учня суттєво впливає на ймовірність успіху (крива сигмоїди стає більш крутою), а низьке

c_i свідчить про “розмитість” завдання, яке слабо розрізняє учнів різних рівнів.

На практиці зазвичай використовується діапазон значень параметра дискримінації в діапазоні $[0,5; 2,5]$, оскільки значення $c_i > 1,5$ дає можливість ефективно відокремити підготовлених користувачів НС від учнів з низьким рівнем підготовки.

Така модель з кількістю навчальних модулів N_{Sc} , що реалізують різні сценарії представлення знань, $d_i = \frac{1}{N_{Sc}}$, відображає випадок простого вга-

дуванню результату учнем. Модель [7] для задачі адаптивного підбору навчального модуля для користувача НС набуває такого вигляду:

$$P\left(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true} \middle| c_i, \frac{1}{N_{Sc}}\right) = \frac{1}{N_{Sc}} + \left(1 - \frac{1}{N_{Sc}}\right) \frac{1}{1 + e^{-c_i(a_i - b_j)}}. \quad (2)$$

У такому вигляді модель дозволяє на кожному кроці навчання обрати найбільш інформативне завдання, тобто завдання, відповідь на яке є найбільш невизначеним для учня, тобто

$P\left(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true} \middle| c_i, \frac{1}{N_{Sc}}\right) = 0,5$ [6]. Ймовірність

правильної відповіді складається з двох компонент – базової ймовірності вгадування $\frac{1}{N_{Sc}}$ та додаткової

ймовірності, яка залежить від різниці між латентними здібностями користувача й складністю завдання.

Латентна здібність b_j користувача оцінюється методом максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood Estimation, або MLE) на основі його відповідей на множину завдань $Q = \{q_i\}$. У методі MLE використовується функція правдоподібності $L(a_i | Q)$:

$$L(a_i | Q) = \prod_i \left(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true} \middle| c_i, \frac{1}{N_{Sc}} \right)^{q_i} \times [1 - P\left(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true} \middle| c_i, \frac{1}{N_{Sc}}\right)]^{1-q_i}. \quad (3)$$

Функція правдоподібності надає змогу оцінити, наскільки ймовірним є отриманий набір відповідей Q для користувача НС з латентною здібністю b_j . Наприклад, розглянемо ситуацію, коли користувач

НС правильно відповів на складні завдання та неправильно на прості, тобто ця комбінація відповідей нетипова для любого значення латентних здібностей b_j . В такому випадку значення $L(a_i | Q)$ буде низьким для всіх значень b_j , що відображає нестабільність відповідей або випадковість.

У випадку, якщо користувач надає правильні відповіді на завдання зі складністю a_i , то $L(a_i | Q)$ досягає максимуму при певному значенні латентних здібностей. Тоді оцінка латентних здібностей b_j^* визначається як значення аргументу b_j , що максимізує функцію правдоподібності $L(a_i | Q)$:

$$b_j^* = \underset{b_j}{\operatorname{argmax}} L(a_i | Q). \quad (4)$$

На основі поточної оцінки латентної здібності (4) може бути здійснений динамічний вибір наступного завдання для користувача. Такий вибір здійснюється з використанням алгоритму комп'ютеризованого адаптивного тестування (Computerized Adaptive Testing, або CAT). Якщо користувач відповідає правильно, то він отримує більш складне наступне завдання з більшим значенням a_i , якщо неправильно – отримує завдання з меншим значенням a_i . Такий алгоритм дає можливість швидше оцінити рівень підготовки здобувача [11, 13].

Вибір наступного завдання здійснюється за критерієм Фішера $I(a_i)$, який показує у кількісному вимірі, скільки інформації про завдання містить відповідь користувача. У даній оцінці використовується перша похідна від ймовірності правильної відповіді. Для спрощення запису позначимо $P\left(\text{result}(a_i, b_j) = \text{true} \middle| c_i, \frac{1}{N_{Sc}}\right)$ як P_{ij} . Тоді критерій Фішера набуває такого вигляду:

$$I(a_i) = b_j^2 \times \frac{(P'_{ij})^2}{P_{ij} \times (1 - P_{ij})}. \quad (5)$$

Значення оцінки (5) досягає максимуму для завдань, складність яких a_i близька до поточної оцінки b_j користувача. Занадто легкі та занадто складні завдання містять мало інформації, оскільки користувач майже напевно відповість правильно на перші і неправильно на другі завдання, що не дає можливість звужити діапазон значень a_i . Тому вибір номера k наступного завдання здійснюється на множині

невиконаних завдань, тобто завдань для яких виконується умова $i < k$, за критерієм:

$$k = \operatorname{argmax}_{i|i < k} I(a_i). \quad (6)$$

Вибір завдань (6) може бути достатньо складним для багатьох класів практичних задач, в тому числі при навчанні водінню авто, управлінню складними технічними системами тощо внаслідок великої кількості різнопланових задач. Для спрощення вибору завдання розділяються на рівні на основі порогових значень здібностей користувача. Такий підхід спрощує диспетчеризації модулів підготовки у навчальній програмній системі.

Завдання розбиваються на рівні складності L_m згідно порогових значень здібностей користувача:

$$L_m = \begin{cases} L1, & \text{iff } b_j^* < -1,0, \\ L2, & \text{iff } -1,0 \leq b_j^* < -0,3, \\ L3, & \text{iff } -0,3 \leq b_j^* < +0,5, \\ L4, & \text{iff } +0,5 \leq b_j^* < +1,2, \\ L5, & \text{iff } b_j^* \geq +1,2. \end{cases} \quad (7)$$

Відповідно до (7) користувачі з низькими $b_j^* < -1,0$ потребують базових модулів рівня L1 без обмежень часу, наприклад ситуації водіння на порожньому паркувальному майданчику, або на вулиці, де є ще один-два автомобілі. Користувачі з середніми $-0,3 \leq b_j^* < +0,5$ отримують можливість вивчити міські сценарії L3 (п'ятнадцять-двадцять автомобілів, наявність перехресть). Користувачі НС з високими значеннями $b_j^* \geq +1,2$ отримують експертні модулі L5 (наявність на вулиці одночасно більше п'ятдесяти автомобілів, виникнення екстремальних ситуацій). Такий підхід надає змогу організувати доступ до модулів у зоні найближчого розвитку навичок та вмінь користувача НС, дещо складніших за його поточний рівень. Використання модулів з незначним підвищенням складності завдань стимулює розвиток навичок без когнітивного перевантаження [14, 15].

Окрім оцінки рівня латентних здібностей, для формування повного вектору фактичного стану умінь користувача НС необхідно врахувати типові помилки користувача U_{error} та траєкторію зміни його навичок з часом U_{trend} . Результуючий вектор профілю помилок має вигляд:

$$U = \langle U_{\text{error}}, U_{\text{trend}} \rangle. \quad (8)$$

Профіль помилок $U_{\text{error}} = \{U_{\text{error}}^{(l)}\}$ містить частоти помилок по рівням l :

– стратегічні, які відображають порушення загальних закономірностей при вирішенні задач; наприклад при навчанні водінню стратегічні помилки включають невірний вибір траєкторії, необгрунтований обгін тощо;

– тактичні, які виникають при вирішенні конкретних практичних завдань; наприклад при навчанні водінню до таких помилок відносяться занадто різке гальмування, невідповідна швидкість на повороті;

– ситуативні - як помилки у відповідь на непередбачені події; наприклад для майбутніх водіїв ситуативними помилками є затримка реакції на пішохода, неправильна оцінка дистанції.

Для кожної категорії помилок необхідно обчислити частоту їх виникнення:

$$U_{\text{error}}^{(l)} = \frac{\text{кількість помилок рівня } l}{\text{загальна кількість дій рівня } l}. \quad (9)$$

Траєкторію зміни навичок а U_{trend} моделює послідовність зміни динаміки b_j з часом, для прогнозування зони найближчого розвитку користувача. Якщо користувач виконав тестові завдання у дискретні моменти часу $1, 2, \dots, t, \dots, T$, то послідовність оцінок його здібностей має вигляд:

$$V = \langle b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{tj}, \dots, b_{Tj} \rangle. \quad (10)$$

Така траєкторія у найпростішому випадку апроксимується лінійною регресією. Значення латентних здібностей користувача у майбутні моменти часу $b_j^*(t)$ обчислюються таким чином:

$$b_j^*(t) = \theta_0 + \theta_1 t, \quad (11)$$

де θ_0 – зміщення, а θ_1 – коефіцієнт нахилу, що характеризує швидкість розвитку навичок та умінь користувача.

Розбиття значень θ_1 на порогові інтервали дає можливість визначити правил вибору навчальних модулів для користувача. Наприклад, якщо $\theta_1 > 0,2$, то користувач характеризується швидким розвитком і з боку НС може бути підвищена складність завдань.

Оцінка рівня підготовки і латентних здібностей користувача має вигляд вектору V_{user}^1 , який включає рівні складності модулів для користувача, поточну оцінку його здібностей, частоту помилок та траєкторію зміни рівня підготовки користувача НС:

$$V_{\text{user}}^1 = \langle L_m, b_j^*, U_{\text{error}}, U_{\text{trend}} \rangle. \quad (12)$$

Метод формування профілю користувача в адаптивній НС складається з таких етапів.

Етап 1. Побудова вхідного набору даних.

На даному етапі виконується агрегація результатів виконання завдань користувачем, що містять інформацію про правильність відповідей, час виконання, тип завдання тощо. При виконанні методу формується набір даних $E = \{e_i\}$.

Етап 2. Оцінка латентних здібностей користувача a_i .

При виконанні даного етапу оцінка здібностей користувача розраховується на основі функції правдоподібності (3) як значення аргументу, що максимізує даун функцію (4).

Етап 3. Уточнення латентних здібностей користувача.

На цьому етапі багаторазово здійснюється вибір тестового завдання з використанням оцінки Фішера (5). Тестові завдання вибираються за формулою (6). При цьому підбирається завдання, складність якого близька до поточної оцінки латентних здібностей користувача НС. Даний етап виконується ітеративно, до досягнення заданої точності оцінки латентних здібностей користувача.

Етап 4. Перетворення отриманої оцінки латентних здібностей користувача у рівні складності завдань для користувача.

Перетворення виконується з використанням порогових значень оцінки латентних здібностей згідно (7), що дає можливість узгодити рівень підготовки користувача і складність навчальних модулів для алгоритму диспетчеризації НС.

Етап 5. Формування профілю типових помилок.

При реалізації етапу використовуються параметри завдань $E = \{e_i\}$, мітки категорій помилок, а також оцінки користувача у попередні моменти часу. Завдання класифікуються за категоріями помилок і обчислюється частоти помилок у кожній категорії відповідно до (9). З використанням лінійної регресії (11) формується траєкторія змін помилок. Результатом етапу є вектор профілю помилок(8), який містить стратегічні тактичні та ситуаційні помилки, що дає можливість визначити патерни прискореного або уповільненого навчання.

Етап 6. Формування вектору профілю користувача навчальної програмної системи.

При формуванні вектору профілю користувача об'єднуються результати попередніх етапів. Отриманий вектор (12) враховує рівень складності завдання для користувача (результат етапу 4), рівень латентних здібностей користувача (результат етапу 3), профіль помилок (результат етапу 5). Вектор може бути представлений у форматі JSON для подальшого збереження в базі даних.

3. Метод поточного психофізіологічного моніторингу поточного стану користувача НС в процесі навчання

Даний метод має забезпечити: моніторинг поточного психофізіологічного стану користувача під час виконання завдань у процесі навчання; автоматизоване виявлення підвищеного когнітивного навантаження; формування рекомендацій для диспетчера навчальних модулів з тим, щоб забезпечити реалізацію принципів модульності, слабкого зв'язування, сильної зв'язності, дотримання яких є обов'язковим при проектуванні адаптивних НС.

Онлайн-оцінка поточного стану користувача в адаптивній НС використовує аналіз варіабельності серцевого ритму (Heart Rate Variability, або HRV). Цей фізіологічний показник відображає варіацію часових інтервалів між послідовними ударами серця. Останні реєструються як інтервали R-R на електрокардіограмі або ж як інтервали між піками пульсової хвилі при вимірюванні сенсорами носимих пристроїв [16]. На відміну від простого вимірювання частоти серцевих скорочень (Heart Rate, HR), що надає лише середнє значення ударів за хвилину, варіабельність серцевого ритму характеризує мікроваріації між ударами, які контролюються автономною нервовою системою, відповідальною за реакцію на стрес, підвищення серцевої активності, мобілізацію організму у відповідь на загрозу чи когнітивне навантаження, а також за релаксацію, відновлення, зниження серцевої активності у спокійному стані. Тому використання варіабельності серцевого ритму дозволяє об'єктивно оцінити поточний психофізіологічний стан користувача [16]. Висока варіабельність серцевого ритму свідчить про релаксований стан користувача, а низька варіабельність сигналізує про когнітивне перевантаження, стрес або втому, що дає можливість виконати онлайн-підбір складності навчальних модулів у навчальних програмних системах [3, 17].

Для оцінки варіабельності серцевого ритму традиційно використовується, різниця ΔRR інтер-

валів серцевих скорочень RR_n при n вимірі та RR_{n-1} при попередньому вимірі $n-1$:

$$\Delta RR = RR_n - RR_{n-1}. \quad (13)$$

Великі значення ΔRR свідчать про релаксацію, а малі значення показують стресовий стан людини. Інтервал серцевих скорочень RR_n визначається для послідовних n та $n-1$ ударів серця. Даний інтервал зазвичай вимірюється в мс між піковими точками пульсової хвилі для мобільних сенсорів (смарт-годинників).

На практиці вікно вимірювань пульсу, як правило, становить 1 хвилину. З розрахунку пульсу в спокійному стані 60 ударів на хвилину кількість вимірювань зазвичай становить $N=60$.

Середньоквадратичне відхилення для різниці ΔRR між послідовними вимірами RR_n описує поточну варіабельність серцевих скорочень:

$$HRV = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N \Delta RR^2}{N-1}}. \quad (14)$$

Якщо користувач НС перебуває у спокійному стані, з низьким когнітивним навантаженням, то ΔRR суттєво змінюється внаслідок, наприклад, фізичних рухів. Якщо ж користувач знаходиться у стресовому стані, то інтервали RR_n змінюються несуттєво, тому різниця ΔRR буде мінімальною. Таке значення свідчить про високе когнітивне навантаження і необхідність зміни навчального модуля. Таким чином, використання аналізу варіабельності серцевого ритму HRV, на відміну від показника частоти серцевих скорочень HR дає можливість розрізнити фізичне навантаження від когнітивного навантаження, оскільки для фізичного навантаження характерна висока, а для когнітивного перевантаження – низька HRV.

Додатково до HRV (14) на даному етапі може бути розраховано відношення частотних компонент варіабельності серцевого ритму. Співвідношення низькочастотних та високочастотних складових $HRV = \frac{HRV_{low}}{HRV_{high}}$ свідчить про поточний стан людини. Значення співвідношення більше 2-х одиниць свідчить про когнітивне перевантаження, а значення менше 1 – про спокійний стан [3, 17]. Для розрахунку даного відношення використовується швидке перетворення Фур'є. Результатом перетворення Фур'є є спектральна щільність потужності серцево-

го ритму, яка інтегрується окремо для низько частотної та високочастотної складової [16].

В якості скалярного індикатора поточного стану користувача НС в рамках запропонованого методу використовується інтегральний показник стану серця H , який враховує нормалізовану варіабельність серцевих скорочень HRV_{norm} та нормалізовану частоту серцевих скорочень HR_{norm} :

$$H = \frac{HRV_{norm} + HR_{norm}}{2}. \quad (15)$$

Нормалізована частота серцевих скорочень HR_{norm} розраховується через співвідношення поточного значення HR_{curr} та значення $HR_{typical}$ у спокійному стані людини:

$$HR_{norm} = \frac{HR_{curr} - HR_{typical}}{HR_{typical}}. \quad (16)$$

Додатково в (15) може бути використана компонента $\frac{HRV_{low}}{HRV_{high}}$. Однак включення до складу H даного показника потребує обґрунтованого вибору вагових коефіцієнтів для всіх трьох компонент.

Для автоматизованої класифікації поточного стану користувача на три категорії когнітивного навантаження на основі часової послідовності ознак стану користувача використовується мережа довгої короткочасної пам'яті LSTM, як призначена для виділення патернів у часі.

Крім ознак HRV_{norm} , HR_{norm} , H , для LSTM в якості елементів вхідних даних використовуються стандартне відхилення RR_{sdnn} на інтервалі спостереження із N вимірів, $\Delta RR_{threshold}$ – відсоток ΔRR , що перевищує порогове значення, середня частота серцевих скорочень HR_{mean} , коефіцієнт αHR лінійної регресії, що відображає тренд зміни серцевих скорочень (збільшення або зменшення).

Нормалізація HRV_{norm} , HR_{norm} дає можливість без додаткових вагових коефіцієнтів обробляти дані різних користувачів.

Агрегований показник стану серця H надає LSTM додаткову інформацію у порівнянні з можливими нелінійними комбінаціями HRV_{norm} , HR_{norm} .

Стандартне відхилення інтервалів RR_{sdnn} розраховується з урахуванням середнього значення інтервалів RR_{mean} та дає можливість виявити довгострокові тренди у послідовності серцевих скорочень:

$$RR_{sdnn} = \left(\frac{\sum_{n=1}^N (RR_n - RR_{mean})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Відсоток різниці між інтервалами серцевих скорочень $\Delta RR_{threshold}$, що перевищує порогове значення, використовується для виявлення переходів між станами низької, нормальної і підвищеної когнітивної активності.

Коефіцієнт αHR визначається при побудові лінійної регресії, задає динаміку зміни серцевих скорочень на поточному інтервалі часу, що дозволяє розрізнити перехід до нового стану когнітивної активності.

LSTM виявляє темпоральні патерни зміни наведених показників у часі: поступове наростання, пік, стабілізація. В рамках типового інтервалу вимірювань у 60 секунд для LSTM, в якості вхідних даних може бути подано 10-12 серій вхідних даних при вимірах протягом 5 і 6 секунд відповідно.

Результатом класифікації є поточний стан когнітивного навантаження користувача B_{user} , який може приймати одне з трьох значень {Високе навантаження; Норма; Низьке навантаження}.

Фінальний вектор поточного стану користувача V_{user}^2 включає нормовані значення HRV_{norm} , HR_{norm} , поточний стан когнітивного навантаження B_{user} та мітку часу $t_{current}$:

$$V_{user}^2 = \langle HRV_{norm}, HR_{norm}, B_{user}, t_{current} \rangle. \quad (18)$$

Вектор V_{user}^2 містить інформацію щодо поточного стану користувача у вигляді, призначеному для обробки компонентом диспетчеризації модулів в навчальній програмній системі. Кожна складова вектору (18) містить інформацію про різні аспекти поточного стану, що дає можливість приймати багатокритеріальні рішення щодо диспетчеризації модулів навчальної системи. Наприклад, підвищення HR_{norm} , зниження HRV_{norm} , та значення B_{user} «Високе навантаження» свідчать про перевищення когнітивного навантаження користувача та необхідність перемикавання на спрощений навчальний модуль.

Розроблений метод реалізує послідовність етапів від обробки біометричних даних у програмній компоненті оцінки стану користувача в режимі реального часу до формування вектору поточного стану користувача.

Метод оцінювання поточного стану користувача НС містить такі етапи.

Етап 1. Збір біометричних даних.

На даному етапі виконується ініціалізація з'єднання з мобільним сенсором за допомогою бездротових протоколів низького енергоспоживання, передача інтервалів часу між серцевими скороченнями, синхронізація міток часу із системним годинником, формування потоку необроблених біометричних даних для подальшої обробки.

Етап 2. Фільтрація та нормалізація сигналів.

Виконується медіанна фільтрація для частоти серцевих скорочень для видалення різких змін частоти серцевих скорочень. При фільтрації виявляються екстрасистолі на інтервалах між серцевими скороченнями, що відхиляються понад певний відсоток від медіани. Подальша нормалізація виконується відносно спокійного стану перед сесією навчання.

Етап 3. Розрахунок ознак варіабельності серцевого ритму.

На даному етапі виконується обчислення середньоквадратичного відхилення варіабельності серцевого ритму з використанням виразу (14). Додатково може бути розраховано співвідношення низькочастотної та високочастотної складових серцевого ритму.

Етап 4. Розрахунок інтегрального показнику стану серця Н.

Інтегральний показник стану серця Н агрегує ознаки серцевого ритму у єдиний скалярний індикатор стану користувача згідно з формулою (15).

Етап 5. Класифікація когнітивного навантаження користувача навчальною програмною системою.

Класифікація виконується на основі довгої короткочасної пам'яті LSTM згідно з формулою (17).

Етап 6. Формування вектору V_{user}^2 поточного стану користувача навчальною програмною системою.

Вектор (18) містить компоненти, що характеризують поточний стан користувача HR_{norm} , зміни стану HRV_{norm} , класифікацію поточного стану та мітку часу. При практичному використанні, для передачі до диспетчера модулів НС та верифікації даний вектор представляється у JSON – форматі.

4. Експериментальна перевірка результатів дослідження

Для проведення експерименту було сформовано контрольну групу користувачів НС з вивчення правил дорожнього руху. Ця група складалася з п'яти осіб, яким були запропоновані стандартні набори тестових завдань. Результати тестування було оцінено із використанням низки поширених методів,

а також за допомогою методу, що розроблений у ході даного дослідження. Порівняння методів здійснено у трьох ключових аспектах, які, за кінцевим рахунком, визначають їх ефективність. Зокрема, кількісне вимірювання точності кожного з методів проводилось у логітах (Logit (log-odds unit) – одиниця виміру (логарифмічна шкала), яка трансформує ймовірності з діапазону (0,1) у континуальну шкалу $(-\infty, +\infty)$, де нульова точка відповідає ймовірності 50%).

Таблиця 1

Порівняння методів оцінки профілю користувача НС

Метод оцінки	Точність (RMSE)	Час (хв)	Ключові обмеження
Threshold-based (за кількістю завдань)	$\pm 0,85$ logits	5–10	Ігнорує складність завдань і траєкторію помилок
Fixed-length testing (30–40 питань)	$\pm 0,45$ logits	30–40	Надмірна тривалість, низька мотивація
Expert assessment (ручна оцінка)	$\pm 0,55$ logits	15–25	Не масштабується, залежить від думки експерта
Простий CAT	$\pm 0,38$ logits	12–18	Не враховує освітню історію
Розроблений метод оцінки профілю користувача	$\pm 0,30$ logits	10–15	Потребує калібрування вхідних параметрів

Результати експерименту (Табл. 1.) свідчать про те, що метод оцінки профілю користувача НС досягає точності $\pm 0,30$ logits, оскільки враховує складність, дискримінативність та випадкове вгадування завдань. Такий показник точності є цілком задовільним при практичному застосуванні. Щодо інших двох аспектів, а саме часу реалізації та обмежень у застосуванні, розроблений метод продемонстрував цілком прийнятний, з практичної точки зору, результат.

Таким чином, застосування розробленого методу надало змогу скоротити час тестування до 10–15 хвилин (з 30–40, у випадку з фіксованою кількістю завдань) внаслідок адаптивності методу. Метод досягає порогового значення 0,3 при пропозиції користувачеві 8–12 питань замість 30–40.

У таблиці 2 наведені результати порівняння ві-

домих методів біометричної оцінки поточного стану користувача НС із методом, що був розроблений у ході даного дослідження. Результати експерименту свідчать про те, що запропонований метод досягає точності 87,3% внаслідок того, що враховує HR та HRV, а також використовує LSTM-класифікатор для виявлення темпоральних патернів на інтервалі у 60 секунд. За іншими показниками, даний метод також не поступається аналогам, але слід зазначити, що саме процедура послідовної реалізації обох розроблених методів обумовлює підвищення ефективності функціонування НС.

Таблиця 2

Порівняння методів біометричної оцінки поточного стану користувача НС

Метод біометричної оцінки	Точність (%)	Латентність (мс)	Вартість (€)	Ключові обмеження
Rule-based HR (Boboc 2024)	65–72	100–180	50–80	Статичні порогови, що збільшує кількість помилок
EEG-based (Nasri 2025)	89–91	300–500	5,000 – 8,000	Інвазивність, висока вартість, велика латентність, що сповільнює отримання результатів
Простий HR (без HRV)	58–67	50–100	30–50	Не відрізняє природний рух головою від ознак стресу
Розроблений метод оцінки стану користувача	87,3	150–220	50–100	Потребує 10 хвилин попереднього калібрування

5. Обговорення результатів

Розроблені у ході дослідження методи забезпечення адаптивності НС мають ряд переваг над традиційними засобами організації процесу навчання. Так, метод формування профілю користувача забезпечує комплексну оцінку індивідуальних характеристик кожного завдання з використанням параметрів розрізнення, складності та вгадування, що дає можливість прискорити процес навчання, шляхом застосування спеціальних модулів узгодженості склад-

ності тестових завдань відповідно із фактичним рівнем підготовленості користувача НС. Метод визначає дискретні рівні складності завдань на основі оцінки спроможностей конкретного користувача, що дає можливість уникнути ручного налаштування порогових значень у процесі розробки програмного забезпечення. Формування профілю помилок та траєкторії розвитку навичок забезпечує можливість підбору навчальних модулів, відповідно до сильних та слабких сторін користувача НС при диспетчеризації модулів. Сформований при реалізації методу вектор профілю користувача забезпечує специфікацію інтерфейсу при взаємодії з компонентами диспетчеризації програмних модулів НС та верифікації результатів її функціонування, що відповідає принципам модульності, слабкого зв'язку та високої зв'язності при проектуванні програмних архітектур.

У розробленому методі використано загальні психометричні принципи оцінки користувачів, інваріантних до предметної галузі, що дає можливість створювати бібліотеки компонент попередньої оцінки стану користувача для навчальних систем з різних предметних галузей, знижуючи вартість розробки через повторне використання коду та масштабування архітектурних рішень.

До недоліків розробленого методу при його впровадженні у процес розроблення адаптивних НС, слід віднести необхідність віддзеркалення специфіки конкретної предметної галузі, у якій проводиться навчання.

Суттєвий позитивний ефект при функціонуванні адаптивних НС, в аспекті персоналізації процесу навчання, виникає внаслідок застосування разом із методом формування профілю користувача і методу оцінювання його психофізіологічного стану.

Розроблений метод онлайн-оцінки стану користувача НС має ряд переваг порівняно з існуючими підходами до моніторингу психофізіологічного стану людини, завдяки врахуванню особливостей організації процесу навчання.

Зокрема, методи точної оцінки когнітивного навантаження у адаптивних навчальних системах на базі електроенцефалографії (EEG) передбачають використання багатоканальних шоломів з електродами, які, на відміну від запропонованого методу, вимагають складної процедури підготовки користувача та обмежують можливості масштабування даного підходу.

Розроблений метод формально представляє стан користувача у вигляді вектору поточного стану, який може бути реалізовано як програмний об'єкт із чітко визначеними типами полів, через представлення у форматі JSON для збереження у базі даних, та для специфікації інтерфейсу з компонентом дис-

петчеризації, який забезпечує адаптивне підключення програмних модулів НС.

Існуючі підходи до класифікації когнітивного навантаження у адаптивних НС зазвичай базуються на простих порогових правилах із використанням біометричних показників, наприклад «якщо частота серцевих скорочень перевищує порогове значення», то користувач має когнітивне перенавантаження. Однак такі правила не враховують індивідуальні відмінності у частоті серцевих скорочень залежно від віку, рівня фізичної підготовки, статі та не дають можливість розрізнити фізичне навантаження. Зокрема, рух головою у НС з використанням технології віртуальної реальності підвищує частоту серцевих скорочень без зміни когнітивного навантаження. Розроблений метод використовує мережу LSTM, яка дає можливість врахувати такі темпоральні патерни, як поступове наростання стресового стану, пікові навантаження, стабілізація стану після перевантаження, і тим самим підвищити точність визначення стану перенавантаження користувача навчальної програмної системи.

Проте, розроблений метод має ряд обмежень. Зокрема, точність обчислення нормалізованої частоти серцевих скорочень та нормалізованої варіабельності серцевого ритму на етапі 2 методу залежить від коректності вимірювання базових параметрів користувача у спокійному стані перед початком навчальної сесії. Також точність вимірювання частоти серцевих скорочень чутлива до рухів користувача. Зокрема, різкі рухи руками під час керування рулем у VR-середовищі при маневруванні, ухиленні від перешкод можуть привести до зміщення сенсора відносно шкіри й викривлення форми пульсової хвилі, що зменшує точність виявлення піків пульсу та інтервалів серцевих скорочень.

Використання розробленого методу онлайн-оцінки поточного психофізіологічного стану користувача НС передбачає здійснення моніторингу через споживчі мобільні пристрої (смарт-годинники); в результаті формується вектор стану користувача у режимі soft real-time. Отриманий вектор може бути представлений у структурованому JSON - форматі, який може бути використаний в рамках міжмодульного інтерфейсу при диспетчеризації програмних модулів НС, в залежності від поточного стану користувача.

Загалом, послідовне застосування розроблених методів являє собою підхід, що забезпечує двофазну оцінку стану користувача НС на основі поєднання векторів індивідуального профілю та поточного стану користувача, що дає можливість виконати оперативну диспетчеризацію програмних модулів НС в залежності не лише від апіорно заданого профілю користувача, а й від його поточного психофізичного

стану, тим самим підвищивши ефективність процесу навчання.

6. Висновки

Проведене дослідження дозволило отримати такі основні результати:

Вперше запропоновано метод автоматизованого формування профілю користувача навчальної програмної системи шляхом оцінки латентних здібностей користувача з використанням психометричних моделей, визначення на цій основі рівнів складності задач для користувача, опису типових помилок і формування вектору профілю користувача як формальної специфікації інтерфейсу з користувачем, що дає можливість автоматизувати процес диспетчеризації та верифікації програмних модулів НС, в залежності від значень компонентів вектору індивідуального профілю користувача.

Удосконалено метод онлайн-оцінки стану користувача в режимі реального часу для адаптивних НС, в якому, на відміну від існуючих, формується інтегральний біометричний індекс на основі аналізу варіабельності серцевого ритму, визначаються патерни серцевого ритму та в результаті, формується вектор поточного стану користувача, який може бути представлений в рамках програмного інтерфейсу для автоматизованої диспетчеризації програмних модулів НС.

Результати експериментальної перевірки засвідчили дієвість розроблених методичних засобів при вирішенні задач, що пов'язані із підвищенням ефективності функціонування НС.

Практична перевага удосконаленого методу полягає у забезпеченні інтеграції компоненти оцінки стану у програмні архітектури адаптивних НС в різних предметних галузях, на основі стандартизованого представлення вектору поточного стану користувача. Така інтеграція може бути виконана у режимі soft real-time в системах навчання водінню у віртуальній реальності, тренажерах для підготовки пілотів з можливостями моніторингу когнітивного навантаження у критичних польотних ситуаціях, у навчальних платформах з моніторингом уваги та швидкості реакції для операторів, що контролюють складне обладнання (наприклад, енергоблоки атомних електростанцій), тренінгових системах для підтримки управлінських компетенцій, тощо.

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. Embretson, S. E. *Item response theory for psychologists [Text]* / S. E. Embretson, & S. P. Reise. – New York : Psychology Press, 2000. – 384 p. DOI: 10.4324/9781410605269.
2. Weiss, D. J. *Application of computerized adaptive testing to educational problems [Text]* / D. J. Weiss, & G. G. Kingsbury // *Journal of Educational Measurement*. – 1984. – Vol. 21, iss. 4. – P. 361–375. DOI: 10.1111/j.1745-3984.1984.tb01040.x.
3. Boboc, R. G., Butilă, E. V., & Butnariu, S. (2024). *Leveraging wearable sensors in virtual reality driving simulators: A review of techniques and applications [Text]* / R. G. Boboc, E. V. Butilă, & S. Butnariu // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, iss. 13. – Article no. 4417. DOI: 10.3390/s24134417.
4. Nasri, M. *Towards Intelligent VR Training: A Physiological Adaptation Framework for Cognitive Load and Stress Detection [Text]* / M. Nasri // *arXiv*. – 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.06461.
5. González-Calatayud, V. *Artificial intelligence for student assessment: A systematic review [Text]* / V. González-Calatayud, P. Prendes-Espinosa, & R. Roig-Vila // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, iss. 12. – Article no. 5467. DOI: 10.3390/app11125467.
6. Lord, F. M. *Applications of Item Response Theory to Practical Testing Problems [Text]* / F. M. Lord. – New York : Routledge, 1980. – 288 p. DOI: 10.4324/9780203056615.
7. Birnbaum, A. *Some Latent Trait Models and Their Use in Inferring an Examinee's Ability [Electronic resource]* / F. A. Birnbaum, M. Lord, & M. Novick // *Statistical Theories of Mental Test Scores*. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1968. – Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573668924705145728?lang=en> – 15.05.2025.
8. Koedinger, K. R. *The Knowledge-Learning-Instruction (KLI) framework: Bridging the science-practice chasm to enhance robust student learning [Text]* / K. R. Koedinger, A. T. Corbett, & C. Perfetti // *Cognitive Science*. – 2012. – Vol. 36, iss. 5. – P. 757–798. DOI: 10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x.

9. Sharma, K. Building pipelines for educational data using AI and multimodal analytics: A “grey-box” approach [Text] / K. Sharma, Z. Papamitsiou, & M. Giannakos // *British Journal of Educational Technology*. – 2020. – Vol. 50, iss. 6. – P. 3004–3031. DOI: 10.1111/bjet.12854.

10. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 42010:2018. Інженерія систем і програмних засобів. Опис архітектури (ISO/IEC/IEEE 42010:2011, IDT) [Електронний ресурс]. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2018. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77960. – 15.05.2025.

11. Weiss, D. J. Improving measurement quality and efficiency with adaptive testing [Text] / D. J. Weiss // *Applied Psychological Measurement*. – 1982. – Vol. 6, iss. 4. – P. 473–492. DOI: 10.1177/014662168200600408.

12. Rasch, G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests [Text] / G. Rasch. – Copenhagen : Danish Institute for Educational Research, 1960. – 184 p. – Available at: https://books.google.com.ua/books/about/Probabilistic_Models_for_Some_Intelligen.html?id=aB9qLgEACAAJ&redir_esc=y – 15.05.2025.

13. van der Linden, W. J. Elements of adaptive testing [Text] / W. J. van der Linden, & C. A. W. Glas // Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-0-387-85461-8.

14. Wood, D. The role of tutoring in problem solving [Text] / D. Wood, J. S. Bruner, & G. Ross // *Journal of Child Psychology and Psychiatry*. – 1976. – Vol. 17, iss. 2. – P. 89–100. DOI: 10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x.

15. Shaffer, F. An overview of heart rate variability metrics and norms [Text] / F. Shaffer, & J. P. Ginsberg // *Frontiers in Public Health*. – 2017. – Vol. 5. – Article no. 258. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.

16. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use [Text] / M. Malik, J. T. Bigger, A. J. Camm, R. E. Kleiger, A. Malliani, A. J. Moss, & P. J. Schwartz // *Circulation*. – 1996. – Vol. 93, iss. 5. – P. 1043–1065. DOI: 10.1161/01.CIR.93.5.1043

17. Stress and heart rate variability: A meta-analysis and review of the literature [Text] / H. G. Kim, E. J. Cheon, D. S. Bai, Y. H. Lee, & B. H. Koo // *Psychiatry Investigation*. – 2018. – Vol. 15, iss. 3. – P. 235–245. DOI: 10.30773/pi.2017.08.17.

References

1. Embretson, S. E., & Reise, S. P. *Item response theory for psychologists*. New York, Publ. Psychology Press, 2000. 384 p. DOI: 10.4324/9781410605269.

2. Weiss, D. J., & Kingsbury, G. G. Application of computerized adaptive testing to educational problems. *Journal of Educational Measurement*, 1984, vol. 21, iss. 4, pp. 361–375. DOI: 10.1111/j.1745-3984.1984.tb01040.x.

3. Boboc, R. G., Butilă, E. V., & Butnariu, S. Leveraging wearable sensors in virtual reality driving

simulators: A review of techniques and applications. *Sensors*, 2024, vol. 24, iss. 13, article no. 4417. DOI: 10.3390/s24134417.

4. Nasri, M. Towards Intelligent VR Training: A Physiological Adaptation Framework for Cognitive Load and Stress Detection. *arXiv*, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.06461.

5. González-Calatayud, V., Prendes-Espinosa, P., & Roig-Vila, R. Artificial intelligence for student assessment: A systematic review. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, iss. 12, article no. 5467. DOI: 10.3390/app11125467.

6. Lord, F. M. *Applications of Item Response Theory to Practical Testing Problems*. New York, Routledge, 1980. 288 p. DOI: 10.4324/9780203056615.

7. Birnbaum, A., Lord, F. M., & Novick, M. R. Some Latent Trait Models and Their Use in Inferring an Examinee's Ability. *Statistical Theories of Mental Test Scores*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1968. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573668924705145728?lang=en>. (accessed 15.05.2025).

8. Koedinger, K. R., Corbett, A. T., & Perfetti, C. The Knowledge-Learning-Instruction (KLI) framework: Bridging the science-practice chasm to enhance robust student learning. *Cognitive Science*, 2012, vol. 36, iss. 5, pp. 757–798. DOI: 10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x.

9. Sharma, K., Papamitsiou, Z., & Giannakos, M. Building pipelines for educational data using AI and multimodal analytics: A “grey-box” approach. *British Journal of Educational Technology*, 2020, vol. 51, iss. 6, pp. 3004–3031. DOI: 10.1111/bjet.12854.

10. DSTU ISO/IEC/IEEE 42010:2018. Інженерія систем і програмних засобів. Опис архітектури (ISO/IEC/IEEE 42010:2011, IDT) [DSTU ISO/IEC/IEEE 42010:2018. Systems and software engineering. Architecture description (ISO/IEC/IEEE 42010:2011, IDT)]. Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77960 (accessed 15.05.2025). (In Ukrainian).

11. Weiss, D. J. Improving measurement quality and efficiency with adaptive testing. *Applied Psychological Measurement*, 1982, vol. 6, iss. 4, pp. 473–492. DOI: 10.1177/014662168200600408.

12. Rasch, G. *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests*. Copenhagen: Danish Institute for Educational Research, 1960. 184 p. Available at: https://books.google.com.ua/books/about/Probabilistic_Models_for_Some_Intelligen.html?id=aB9qLgEACAAJ&redir_esc=y. (accessed 15.05.2025.)

13. van der Linden, W. J., & Glas, C. A. W. *Elements of adaptive testing*. Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-0-387-85461-8

14. Wood, D., Bruner, J. S., & Ross, G. The role of tutoring in problem solving. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 1976, vol. 17, iss. 2, pp. 89–100. DOI: 10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x.

15. Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 2017, vol. 5, article no. 258. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.

16. Malik, M., Bigger, J. T., Camm, A. J., Kleiger, R. E., Malliani, A., Moss, A. J., & Schwartz, P. J. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use.

Circulation, 1996, vol. 93, iss. 5, pp. 1043–1065. DOI: 10.1161/01.CIR.93.5.1043.

17. Kim, H. G., Cheon, E. J., Bai, D. S., Lee, Y. H., & Koo, B. H. Stress and heart rate variability: A meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry Investigation*, 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 235–245. DOI: 10.30773/pi.2017.08.17.

Отримано 10.09.2025, отримано у доопрацьованому вигляді 12.11.2025

Дата ухвалення 17.11.2025, дата публікації 08.12.2025

METHODS FOR CONSTRUCTING ADAPTIVE SOFTWARE FOR EDUCATIONAL SYSTEMS

Artur Maliuha

The subject of the article is a methodological basis for ensuring the adaptability of educational systems (ES) with biometric feedback to the user in real time, which ensures the personalization of the learning process. The goal is to increase the efficiency of computer-aided learning tools by developing methods for forming an ES user profile based on the integration of previous psychometric assessments of the level of training, analysis of learning results, and subsequent conversion of information about the user's state into discrete levels of complexity for the dispatching of training modules within the ES. Tasks that need to be solved are the following: to conduct a critical analysis of approaches to creating adaptive ES with biometric feedback and means of personalizing the learning process; to develop a method for forming an individual ES user profile that will ensure a rational learning trajectory, considering the specifics of the process of acquiring knowledge, skills, and abilities inherent in each individual learner; and to develop a method for assessing the current state of the ES user in real time, based on data received from mobile sensors, considering the existing operational and cost limitations of biometric monitoring devices. The following results were obtained. A method for the automated formation of the user profile of the educational software system by assessing the latent abilities of the user, using psychometric models, determining on this basis the levels of complexity of test tasks, describing typical errors, and forming a vector of the individual profile of the ES user, and a method for the online assessment of the current psychophysical state of the user were developed. The practical advantage of the developed methods is that they ensure the integration of the state assessment component into the software architectures of adaptive ES in various subject areas, based on a standardized representation of the vector of the current state of the user. Such integration can be performed in soft real-time mode in virtual reality driving training systems, pilot training simulators with the ability to monitor cognitive load in critical flight situations, in training platforms with monitoring of attention and reaction speed for operators controlling complex equipment (for example, nuclear power plant power units), training systems to support management competencies, etc. Conclusions. As a result of the conducted research, an approach was created to ensure the proper level of adaptability of the ES, through the consistent application of user personalization methods in the training process, namely the formation of their individual profile, and monitoring of the current psychophysical state in online mode. The scientific novelty of the obtained results lies in the following. For the first time, a method for the automated user profile formation of an educational software system by assessing the latent abilities of the user using psychometric models, determining on this basis the levels of complexity of tasks for the user, describing typical errors and forming a user profile vector as a formal specification of the user interface, which makes it possible to automate the process of dispatching and verifying software modules of the ES, depending on the values of the components of the vector of the individual user profile. The method of online assessment of the user's state in real time for adaptive ES has been improved, in which, unlike existing ones, an integral biometric index is formed based on the analysis of heart rate variability, heart-rate patterns are determined and, as a result, a vector of the current user state is formed, which can be represented within the framework of a software interface for the automated dispatching of software modules of the ES. The results of the experimental verification demonstrated the effectiveness of the developed methodological tools in solving problems related to increasing the efficient functioning of the ES.

Keywords: training system; adaptability; psychometric characteristics of the user; biometric feedback; cognitive load; Computerized Adaptive Testing; Item Response Theory; Maximum Likelihood Estimation; level of complexity of the test task; trajectory of skill change, latent abilities of the user.

Малюга Артур Іванович – асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Artur Maliuha – PhD Student at the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: artur.maliuha@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1855-5757.