

УДК 004.9+628.98

ПЕТРЕНКО Т. Г., к.т.н, доцент

ПАВЛУСЕНКО К. О., PhD студентка

(Український державний університет залізничного транспорту)

Концептуальна модель людино-орієнтованої розумної системи освітлення

Система людино-орієнтованого розумного освітлення (Human Centric Lighting, HCL) є частиною розумного будинку і призначена для створення функціонального, економічного та комфортного для людини оточення. Дослідження циркадного ритму людини (Human Circadian Rhythm, HCR) доводять важливість створення HCL з урахуванням факторів впливу параметрів освітлення на людину. У статті запропонована концептуальна модель HCL системи на основі збалансованого HCR.

Ключові слова: людино-орієнтована система розумного освітлення, циркадний ритм людини, концептуальна модель, нечітка змінна зсуву циркадного ритму.

Вступ

Дослідження циркадного ритму людини поширюється з подальшим розвитком штучного інтелекту речей (Artificial intelligence of things, AIoT). Суттєвим фактором є можливість сучасних систем AIoT отримувати значення стимулів HCR за допомогою сенсорів, аналізувати вплив стимулів на зміну стану людини за допомогою штучного інтелекту і, нарешті, створювати штучне оточення, що у свою чергу формує необхідні стимули оточення HCR і дає змогу створювати складні системи людино-орієнтованого розумного оточення.

HCR («внутрішній годинник людини») – це приблизно добовий ритм зміни фізичного, психічного та поведінкового стану людини. Природний HCR зберігається в постійних умовах, тобто в постійній темряві, з періодом близько 24 годин, за дослідженнями. Період ритму в постійних умовах називається періодом вільного ходу (τ). Під впливом зовнішніх факторів стан людини корегується численними ітераціями циркадного ритму впродовж усього життя людини та ґрунтується на генетичних властивостях організму людини (персоналізований HCR).

З точки зору AIoT HCR розглядається як модель складних взаємовідносин стану людини та оточення. Людина бажає мати вплив на керування ним, але досить часто не має можливості аналізувати складні причинно-наслідкові зв'язки факторів впливу. Як результат, дослідження відмічають такі наслідки

порушення циркадних ритмів людини, як ожиріння, депресія, рак і багато інших. Увага до створення персоналізованого розумного оточення для людини була причиною створення розумних речей інтернету речей (Internet of Things, IoT), таких як розумні годинники, будівлі та міста.

У статті розглянуто загальні фактори впливу на зміни HCR, фактори впливу освітлення на зміни HCR, вимоги до створення HCL системи та запропоновано концептуальну модель HCL системи на основі нечіткого підходу.

Постановка проблеми, аналіз досліджень та публікацій

В основі природного регулювання циркадного ритму людини лежать молекулярні механізми. У 2017 році Нобелівська премія з фізіології або медицини була дана роботі, що розкриває механізми циркадного регулювання. Розвиток розуміння молекулярних механізмів HCR стимулював дослідження і створення практичних проєктів автоматизованого розумного оточення людини, а саме систем HCL.

Сучасні дослідження намагаються відповісти на питання «Які процеси впливають на HCR?», «Як саме впливають ті чи інші фактори?», «Які фактори найбільше впливають на HCR?», «Як сучасні інтернет речі можуть впливати на HCR?», «Як збалансувати стан організму конкретної людини за допомогою регулювання певних зовнішніх подразників HCR?» і багато інших.

Дослідження HCR визначають взаємозв'язки між HCR та такими факторами:

- 1) фізична активність людини (кількість та інтенсивність фізичної активності);
- 2) режим харчування людини (дотримання певної дієти чи певних проміжків часу між вживанням їжі);
- 3) біологічний і фізичний стани людини (вміст у крові мелатоніну, кортизолу, тестостерону та інших гормонів, температура тіла і тиск);
- 4) фізіологія людини (вік, стать);
- 5) стан навколишнього середовища (температура, вологість, якість повітря тощо);
- 6) стан освітлення (штучне та природне освітлення; спектральний склад світла, включно з кількістю синього світла в освітленні; колірна

температура світла; інтенсивність освітлення; тривалість освітлення різними джерелами світла).

На рис. 1 зображено фактори впливу на HCR, обґрунтування яких розглянуто в роботах [1-3].

Найпоширенішими є дослідження взаємозв'язку між світлом і HCR [4-6].

Суттєвим недоліком усіх існуючих досліджень є вивчення лише певного, часто досить вузького, напрямку впливу на HCR без комплексного підходу до цього питання.

У роботі пропонується концептуальна модель людино-орієнтованої розумної системи освітлення, побудованої на нечіткій моделі збалансованого циркадного ритму людини.

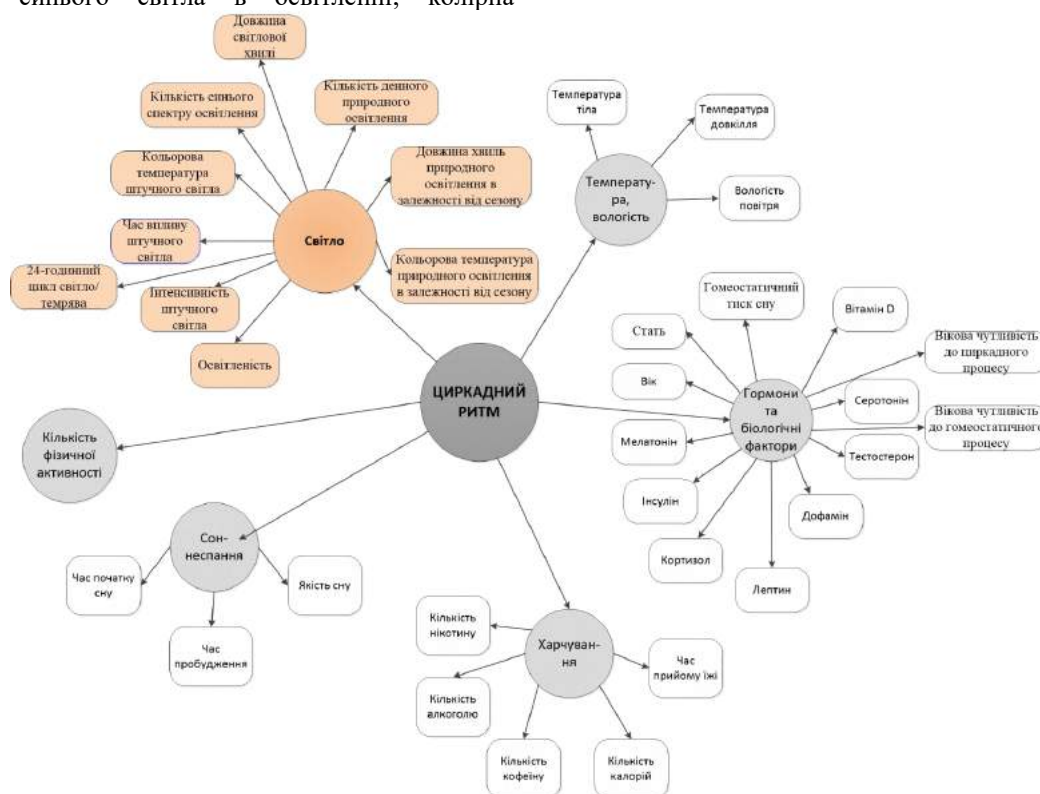


Рис. 1. Фактори впливу на зміну циркадного ритму людини

Виділення невирішених проблем в дослідженнях

HCR є важливою складовою здорового життя людини як регулятор біологічних процесів людини [2]. HCR (приблизно 24,5 години) - це природні коливання функцій організму, пов'язані з добовим циклом світла і темряви. Зміна HCR завдяки зовнішнім факторам впливу (подразникам, наприклад, світла і температури) називається захопленням, а подразник, що призводить до залучення ритму, називається zeitgeber, інакше «дар часу».

Світло - це частина електромагнітного спектра з довжиною хвилі між 380 і 780 нм, що сприймається очима людини. За наявності освітлення людина бачить кольори, а за відсутності - лише відтінки сірого.

Відповідно до природи освітлення світло має візуальний, емоційний і біологічний вплив на людину [4]. Природний HCR формується завдяки біологічному впливу світла на людину.

У HCR виділяють дві фази – сну та неспання. Вплив світла як зовнішнього подразника є найбільш вагомим для зміни HCR. Механізм впливу світла

реалізується в організмі людини за допомогою складних гормональних процесів. Важливою складовою механізму впливу є коливання мелатоніну в крові людини.

Гормон мелатонін виробляється шишкоподібною залозою в головному мозку людини та відіграє важливу роль у регулюванні HCR. Вироблення мелатоніну пов'язано зі зміною світла і темряви, а саме вироблення мелатоніну підвищується в темряві та знижується під впливом світла [1].

Освітлення прямо впливає на мелатонінову систему через рецептори світла, що знаходяться в різних частинах тіла людини, включаючи очі та шкіру. У разі потрапляння в очі людини світло активує фоточутливі рецептори сітківки (стрижневі, колбочкові клітини та світлочутливі гангліозні клітини). Ці рецептори пересилають сигнали до мозку через зоровий нерв та активують нейрони у відповідних ділянках мозку.

Активовані нейрони у свою чергу впливають на мелатонінову систему шляхом регулювання активності шишкоподібною залозою. Шляхом зменшення вироблення мелатоніну під впливом світла відповідні нейрони зменшують активність ферментів, що забезпечують перетворення серотоніну в мелатонін. Це призводить до зменшення рівня мелатоніну в крові та порушення HCR [7].

Найбільшу енергетичну залежність у спектральному діапазоні видимого світла, що може проникати глибоко в сітківку ока і прямо впливати на баланс гормону мелатоніну в організмі та спричиняти ряд негативних наслідків для здоров'я, має синє світло (від 450 до 480 нм) [5]. Коли людина отримує штучне синє світло вдень або перед сном, це пригнічує продукцію мелатоніну і порушує HCR.

Стан освітлення в різні часи доби має різний вплив на HCR. Штучне світло може викликати негативну зміну HCR, особливо якщо воно має високу інтенсивність і спектральний склад, що не відповідає природному ритму світла і темряви. Отже, проектування системи та керування нею освітлення приміщення з урахуванням параметрів впливу світла може стабілізувати CR конкретної людини.

Освітлення може впливати на HCR через два механізми: прямий вплив на мелатонінову систему та непрямий вплив на HCR.

До непрямого впливу на HCR відносять вплив соціального ритму (години, коли людина прокидається та лягає спати, їсть і працює; ці години можуть бути різними в різних країнах або культурах), фізична активність, вік людини, харчування і стрес.

Прямий вплив на HCR має такий фактор, як світло. У свою чергу світло впливає по-різному навіть на різні частини ока людини за допомогою зорових і незорових рецепторів.

Для оцінювання впливу системи освітлення приміщення на HCR ураховують спектральний склад світла, інтенсивність світла і тривалість впливу світла.

Вивчення спектрального складу світла доводить, що його вплив може бути збалансованим відносно природного циркадного ритму завдяки фільтрації хвиль різної довжини. Вивчення впливу колірної температури світла доводить також необхідність моніторингу та керування цим подразником циркадного ритму в HCL системі.

Для формалізації впливу освітлення на HCR розроблені індикатори – фактор циркадної дії (Circadian Action Factor, CAF), циркадний стимул (Circadian Stimulus, CS), еквівалентний меланопічний люкс (Equivalent Melanopic Lux, EML) і крива фазової відповіді (Phase Response Curve, PRC).

Індикатор CAF дає змогу оцінити вплив джерела світла, пов'язує циркадні величини з фотометричними, відображує циркадний ефект джерела світла та описує циркадну ефективність різних кольорів світла. CAF обчислюється як співвідношення відбитого світлового потоку і загального світлового потоку [8].

Дослідженнями встановлені співвідношення значень CAF, виду діяльності людини та колірної температури джерела світла, що впливають на збалансованість HCR. Під час відпочинку пропонується значення CAF менше 0,4, значення колірної температури менше 3000 K; під час офісної роботи чи навчальної діяльності CAF може бути в межах від 0,3 до 0,8, колірна температура – від 3300 до 5300 K. Під час концентрації, напруженої роботи рекомендоване значення CAF має перевищувати 0,7, а колірна температура має бути вища за 5300 K [8]. CAF приблизно описує вплив різних кольорів світла на HCR.

Індикатор CS (W/m²) запропоновано для оцінювання спектрально зваженого освітлення для HCR. Встановлено прямо пропорційний зв'язок CS і нічного пригнічення мелатоніну після однієї години світлового впливу [8, 9]. Розраховані значення CS для різних видів діяльності людини, що відповідають потрібному освітленню збалансованого HCR. Так, для шкали [0,1] відносних значень CS пропонується значення CS менше 0,4 для часу відпочинку, а для робочого часу – більше 0,7.

Індикатор EML використовується в міжнародному стандарті WELL Building для вимірювання впливу світла на HCR в архітектурних спорудах [10]. EML вимірюється по вертикалі на висоті очей користувача і для розрахунку необхідно помножити значення освітленості (lux) на меланопічний коефіцієнт для отримання значення освітленості в еквівалентних меланопічних люксах [8]. Індикатор урахує для бажаного спектра світла

оцінку впливу кожного з п'яти фоторецепторів в оці людини.

Рекомендовано витримувати значення EML вночі та під час відпочинку меншим за 50 еквівалентних меланопічних люксів, а вдень більшим за 200 еквівалентних меланопічних люксів.

Вплив світла на фазу циркадного ритму мелатоніну описується кривою фазової відповіді (PRC), що вказує на величину та напрямок фазового зсуву [11].

У дослідженні циркадного ритму PRC ілюструє зв'язок між стимулом, таким як вплив світла, і відповіддю – зсувом циркадного ритму (зсув фази). Зсув фази у HCR означає, що час засинання та пробудження перемістяться раніше (випередження фази) або пізніше (затримка фази) [11].

PRC зазвичай використовується при вивченні хронобіології для виявлення впливу різних факторів навколишнього середовища на певний HCR. Це фундаментальний хронобіологічний інструмент для вивчення циркадних дисбалансів людини [12].

Індикатори впливу освітлення дають змогу виділити найбільш суттєві відносини між факторами впливу світла на HCR.

Мета та задачі дослідження

Людино-орієнтовані системи розумного освітлення приміщення (HCL) – це системи освітлення, розроблені для покращення комфорту і здоров'я людини. HCL системи враховують біологічні потреби людини, відповідно HCR, і забезпечують освітлення відповідно до ритму дня та ночі.

HCL можуть впливати на HCR, змінюючи спектральний склад світла, інтенсивність і тривалість освітлення. Основні фактори впливу світла на HCR включають таке:

1) інтенсивність світла впливає на HCR [5, 13]. HCL регулює інтенсивність світла в приміщенні відповідно до часу дня (ночі) та активності людини. Яскраве світло може збуджувати людину і підвищувати її бадьорість, тоді як приглушене світло ввечері може заспокоювати і допомагати заснути. Для визначення рівня інтенсивності світла треба враховувати різні фактори впливу, такі як вік, стан здоров'я та індивідуальні потреби людини;

2) спектральний склад світла описується різними довжинами хвиль, присутніх у світлі, що падає на предмет освітлення. HCR залежить від спектрального складу світла, що оточує людину протягом дня та відповідно до часу дня [14]. Наприклад, вранці HCL система може забезпечувати більш холодне та більш синє світло, щоб підвищити енергію та покращити настрій, а ввечері – більш тепле та жовтувате світло, щоб допомогти заспокоїтися та підготуватися до сну. Колірна температура світла

відтворює присутність різних кольорів у спектрі. Виділяють три категорії колірної температури - тепле світло (менше 3300 K), біле нейтральне світло (від 3300 до 5300 K) і холодне біле світло (вище 5300 K). Різні джерела світла матимуть різний спектральний склад і відповідно різну кольорову температуру;

3) тривалість світла впливає на HCR [5]. Якщо людина витрачає багато часу в приміщенні зі штучним освітленням пізно ввечері, це може порушити HCR та призвести до проблем зі сном. За допомогою HCL системи можна налаштувати тривалість світла в приміщенні відповідно до часу дня та потреб користувача;

4) HCL система може забезпечити використання різних режимів світла для різних годин дня - режим роботи при значній інтенсивності протягом робочого дня і режим відпочинку, коли світло зменшується і плавно вимикається ввечері;

5) HCL система має бути персоналізованою. Урахування індивідуальних властивостей людини забезпечується адаптивним характером HCL системи;

6) можливість вибору різних налаштувань освітлення, таких як інтенсивність світла, колірна температура, різні джерела світла, зональність освітлення, тривалість природного та штучного освітлення – це базові фактори впливу на комфортне для людини освітлення. Адаптивність системи досягається налаштуваннями HCL системи для індивідуального користувача шляхом накопичення даних і аналізу засобами AIoT. Персональні дані вподобань користувача, особисті потреби, ритми активності та відпочинку, залежно від власних вимог користувача є корисними для аналізу сучасними методами штучного інтелекту. Наприклад, якщо людина працює вночі і спить вдень, то HCL система може налаштуватися на знижену інтенсивність світла вдень і підвищену вночі. Адаптація до потреб користувачів також може включати аналіз ручного втручання користувача в керування світлом за допомогою додатків на смартфонах або інших пристроях, що дають змогу користувачам змінювати налаштування світла в будь-який момент;

7) HCL система виконує автоматичне реагування на присутність людини за допомогою датчиків руху в приміщенні та регулює рівень освітлення відповідно до зорових робіт людини. Наприклад, якщо датчики виявлять рух або присутність людини в приміщенні ввечері або вночі, система може автоматично встановити рівень світла для створення більш темної атмосфери. З іншого боку, вранці або вдень, коли активність людини в приміщенні більш очікувана, система може підвищити рівень світла для стимулювання більш енергійної атмосфери. Урахування наявності людини в приміщенні та характеру зорової роботи людини не

8) тільки підтримує природний ритм життя, але і забезпечує енергоефективність HCL системи;

9) HCL система враховує вплив зміни зовнішніх світлових умов залежно від часу доби та сезону року, що дає змогу зменшити витрати на освітлення. Наприклад, взимку, коли дні стають коротшими, система освітлення може автоматично збільшувати рівень штучного світла в приміщенні вранці для забезпечення більшої активності людини. У вечірній час, коли зовнішнє освітлення стає слабким, вибір системи може бути різним – або зменшувати рівень освітлення, щоб зменшити навантаження на очі та допомогти розслабленню людини, або, навпаки, збільшити рівень світла в приміщенні відповідно до персоналізованого плану освітлення.

Сучасний стан дослідження змін HCR і створення HCL систем використовують різні підходи та моделі керування освітленням (нечітка класифікація, нечітка система керування, методи машинного навчання) [15-17], але ці системи доволі фрагментарно описані в джерелах. У статті пропонується концептуальна модель HCL системи, побудована на нечіткій моделі збалансованого циркадного ритму людини.

Основна частина

Концептуальна модель HCL системи впливу людино-орієнтованої системи розумного освітлення приміщення на HCR подана на рис. 2 за допомогою UML діаграми варіантів використання (Use Cases).

Актор (User) є користувачем людино-орієнтованої системи.

Керування системою може відбуватися за допомогою мобільного додатка, що передає дані у приватну хмару.

Хмара містить чотири додаткові модулі керування, окрім модуля освітлення, а саме модуль енергоефективності (Energy efficiency module) – за допомогою датчиків присутності людини вмикання/вимикання системи освітлення; модуль даних про навколишній світ (Environmental data module) – за допомогою датчиків температури, вологості, а також даних про погоду та пору року, регулювання штучного освітлення з урахуванням кількості природного світла; модуль даних про користувача (User data module) – вік, стать та інші дані про користувача, необхідні для персоналізації HCL системи; модуль даних про сон (Sleep data module) – якість і режим сну користувача.

Усі модулі мають вплив на автоматичний режим роботи концепту персоналізованого розкладу освітлення (Personalized Lighting Schedule), що включає концепт регуляції циркадного ритму (Circadian Rhythm Regulation). Circadian Rhythm Regulation є ключовим концептом HCL системи для

правильного впливу на HCR і, як наслідок, здоров'я, настрої і самопочуття людини.

Для збалансування циркадного ритму HCL система має підтримувати цикл денної та нічної активності користувача: підтримка неспання або бадьорості (Wakefulness Promotion) – сприяння пробудженню та пильності; підтримка сну (Sleep Promotion) – підготовка до сну і безпосередньо сон.

Залежно від часу доби виділено чотири концепти освітлення: ранкове (Morning lighting), денне (Daylighting), вечірнє (Evening lighting) і нічне (Night lighting). Уранці та вдень світло має бути більш яскраве та холодне. Увечері світло має бути більш тьмяне і тепле, а вночі дуже слабке або взагалі відсутнє.

Кожний концепт виду освітлення включає такі концепти, як спектральний склад світла (Spectral composition of light), інтенсивність світла (Light intensity) і тривалість освітлення (Lighting duration) для керування параметрами освітлення у приміщенні (на рис. 2 концепти керування виділені рожевим кольором).

Також основний концепт Personalized Lighting Schedule включає статистичні дані про зміну налаштувань користувачем (Statistics about settings by the user), до якого входять концепти спектрального складу світла (Spectral composition of light), інтенсивності світла (Light intensity) за планом тривалості освітлення на наступну добу (для персоналізації системи).

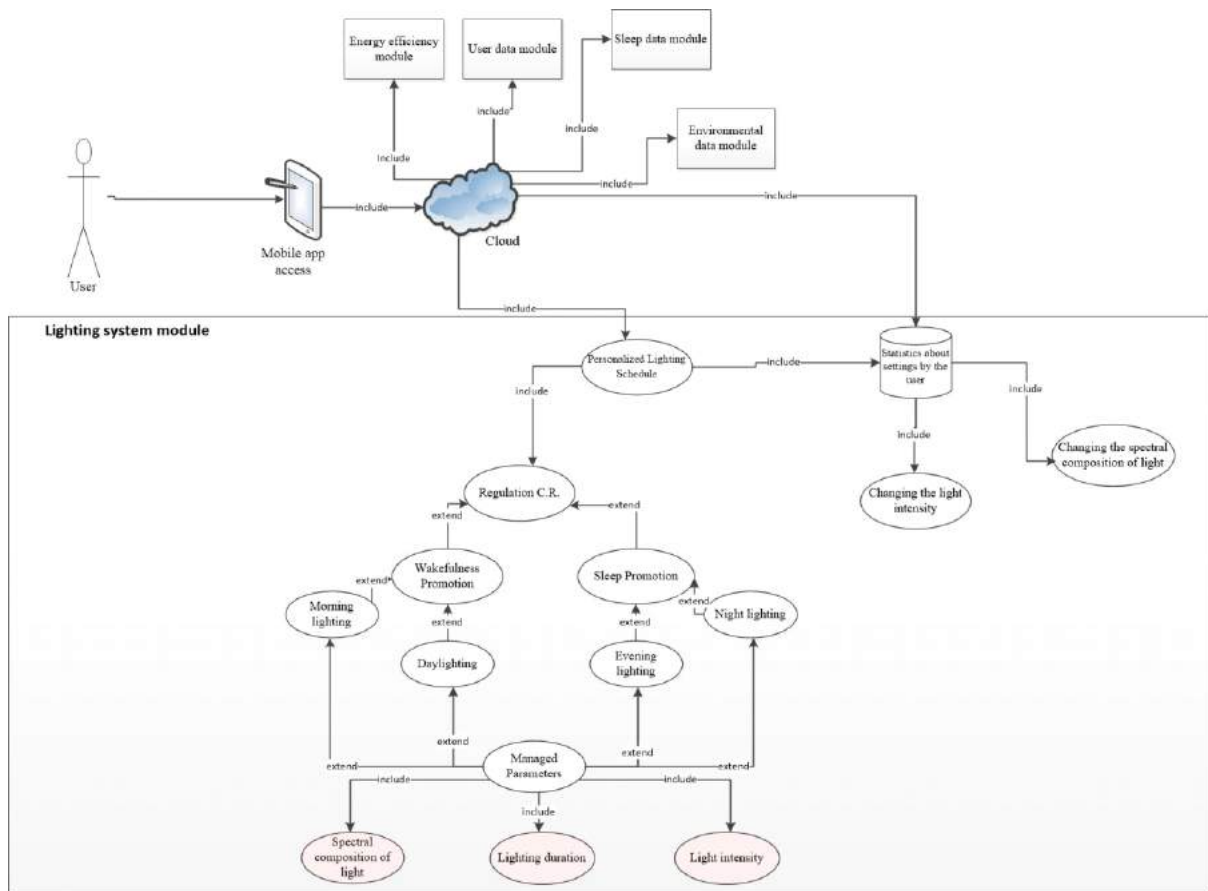


Рис. 2. Діаграма варіантів використання системи HCL

HCL за кількістю і взаємним впливом концептів є складною динамічною системою, що має джерела невизначеності параметрів:

1) результат роботи системи має задовольняти користувача з точки зору комфортності системи освітлення. Визначення комфортності системи може бути сформоване як експертне знання (нечітка змінна «комфортність»);

2) взаємний нелінійний вплив багатьох факторів впливу освітлення на HCR робить систему керування складною, що є додатковим джерелом невизначеності;

3) індивідуальна чутливість людини до параметрів системи освітлення може бути оцінена експертом і носить нечіткий характер;

4) результати вимірювання параметрів освітлення мають невизначеність за рахунок похибки вимірювання;

5) індикатори впливу освітлення на HCR побудовані дослідниками експериментально та здебільшого спираються на визначення рівня мелатоніну в крові людини, що не може бути повсякденною практикою для HCL системи.

Природно, що такі показники мають бути подані як нечіткі змінні.

Наприклад, індикатор впливу освітлення «крива фазової відповіді (PRC)» має бути подана в HCL системі як нечітка змінна «зсув циркадного ритму» (Shift of the Circadian Rhythm, SCR).

На рис. 3 зображена нечітка лінгвістична змінна з трьома термами – невеликий, середній і великий зсуви (Low, Middle, High).

Оскільки в кожного суб'єкта (користувача HCL системи) календарна доба поділяється умовно на суб'єктивний день і ніч тривалістю кожна по 12 годин, то випередження збалансованого HCR – це поступове зміщення дня на ніч. Випередження збалансованого HCR в 10 годин і вище є критичним, бо в користувача майже повністю помінялися місцями день і ніч. Таке відхилення потребує негайного корегування. Відхилення такого типу відображено в термі High. Відхилення HCR у межах однієї години в бік затримки або випередження порівняно зі збалансованим станом освітлення не є критичним і може самостійно корегуватися внутрішнім біологічним годинником протягом декількох днів. Таке відхилення належить до

низького і відображено в термі Low. Затримка HCR на три-п'ять годин порівняно зі збалансованим належить до терму Middle і є середнім відхиленням,

оскільки такий зсув не має миттєвих наслідків, а призводить до накопичуваної дії на організм суб'єкта.

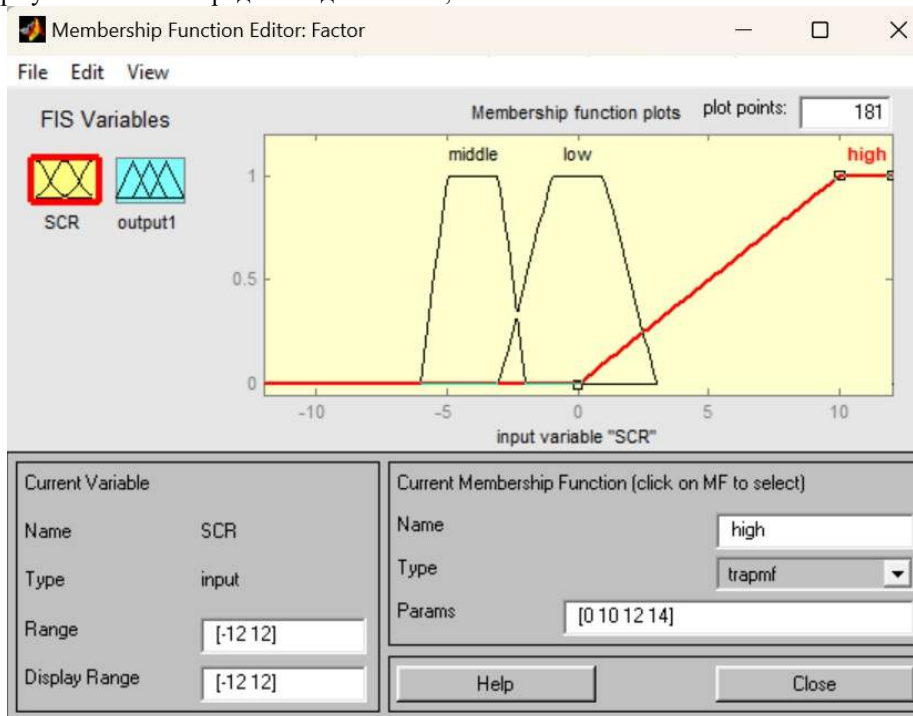


Рис. 3. Нечітка змінна «зсув циркадного ритму» (Matlab 6.1)

Висновки

Циркадний ритм людини як модель складних взаємовідносин стану людини та оточення потребує подальших досліджень для створення комфортного для людини розумного будинку. Освітлення є найбільш вагомим фактором впливу на HCR, а створення людино-орієнтованих систем розумного освітлення приміщення потребує врахування встановлених факторів впливу на HCR.

У статті систематизовані як загальні фактори впливу на HCR, так і фактори впливу освітлення на HCR, проаналізовані індикатори впливу освітлення, обґрунтована необхідність створення HCL системи на основі нечіткого підходу та запропонована концептуальна модель HCL системи. За використанням сучасних досліджень впливу освітлення запропонована нечітка лінгвістична змінна для опису зсуву циркадного ритму під впливом подразників HCR.

У подальшому планується створення динамічної нечіткої моделі на основі подання знань HCL системи у вигляді нечітких змінних та операцій над нечіткими змінними.

Список використаних джерел

1. Yousefzadehfard Y., Wechsler B., DeLorenzo C. Human circadian rhythm studies: Practical guidelines for inclusion/exclusion criteria and protocol. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2022.100080> (Last accessed: 1.06.2023).
2. Chan K., Wong F. S., Pearson J. A. Circadian rhythms and pancreas physiology: A review. *Frontiers in Endocrinology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.920261> (Last accessed: 1.06.2023).
3. Rijo-Ferreira F., Takahashi J. S. Genomics of circadian rhythms in health and disease. *Genome Medicine*. 2019. Vol. 11/1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13073-019-0704-0> (Last accessed: 1.06.2023).
4. Papatsimpa C., Bonarius J. H., Linnartz J. P. M. G. Human Centric IoT Lighting Control based on Personalized Biological Clock Estimations. 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), New Orleans, LA, USA. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/wf-iot48130.2020.9221206> (Last accessed: 1.06.2023).
5. Chellappa S. L. Individual differences in light sensitivity affect sleep and

6. circadian rhythms. *Sleep*. 2020. Vol. 44/2. URL: <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa214> (Last accessed: 1.06.2023).
7. Kim K.-M. et al. Development of a natural light reproduction system for maintaining the circadian rhythm. *Indoor and Built Environment*. 2019. Vol. 29/1. P. 132–144. URL: <https://doi.org/10.1177/1420326x19855421> (Last accessed: 1.06.2023).
8. Lok R. et al. Daytime melatonin and light independently affect human alertness and body temperature. *Journal of Pineal Research*. 2019. Vol. 67/1. URL: <https://doi.org/10.1111/jpi.12583> (Last accessed: 1.06.2023).
9. Busatto N. et al. Application of Different Circadian Lighting Metrics in a Health Residence. *Journal of Daylighting*. 2020. Vol. 7/1. P. 13–24. URL: <https://doi.org/10.15627/jd.2020.2> (Last accessed: 1.06.2023).
10. CS Calculator. Lighting Research Center. URL: <https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/> (Last accessed: 1.06.2023).
11. International WELL Building Institute. URL: <https://www.wellcertified.com/certification/v1/standard/tables> (Last accessed: 1.06.2023).
12. Addressing Oversimplifications. URL: <https://ccb.ucsd.edu/the-bioclock-studio/education-resources/basics/part3.html> (Last accessed: 1.06.2023).
13. Arguelles-Prieto R. et al. Phase Response Curve to Light under Ambulatory Conditions: A Pilot Study for Potential Application to Daylight Saving Time Transitions. *Biology*. 2022. Vol. 11/11. URL: <https://doi.org/10.3390/biology11111584> (Last accessed: 1.06.2023).
14. Pereira M. O. K. et al. Adjustable lighting system based on circadian rhythm for human comfort. *Journal of Optics*. 2022. Vol. 51. P.1028-1037. URL: <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00874-4> (Last accessed: 1.06.2023).
15. Marin-Donagueda M. et al. Simultaneous optimization of circadian and color performance for Smart Lighting systems design. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111456> (Last accessed: 1.06.2023).
16. Sornalakshmi K., Venkataraman R., Parthiban N., Kavitha V. IoT based Circadian Rhythm Monitoring using Fuzzy Logic. In Proceedings of the 6th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security (IoTBDs 2021). Vol. 1. P. 223-228. URL: <https://doi.org/10.5220/0010451502230228> (Last accessed: 1.06.2023).
17. Perumal S. R., Baharum F. Design and Simulation of a Circadian Lighting Control System. *Journal of Daylighting*. 2022. Vol. 9/1. P. 64-82. URL: <https://doi.org/10.15627/jd.2022.5> (Last accessed: 1.06.2023).
18. Putrada A. G. et al. Machine Learning Methods in Smart Lighting Toward Achieving User Comfort: A Survey. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 45137-45178. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169765> (Last accessed: 1.06.2023).

Petrenko T. G., Pavlusenko K. O. Conceptual model of a human-oriented smart lighting system

Abstract. The Human Centric Lighting (HCL) system is part of a smart home and is designed to create a functional, economical and comfortable environment for people. Studies of the human circadian rhythm (Human Circadian Rhythm, HCR) prove the importance of creating HCL taking into account the factors influencing the lighting parameters on a person. The paper proposes a conceptual model of the HCL system based on balanced HCR.

Keywords: Human Centric Lighting system, Human Circadian Rhythm, conceptual model, circadian rhythm shift fuzzy variable.

Надійшла 12.06.2023 р

Петренко Тетяна Григорівна, к.т.н., доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: petrenko_tg@kart.edu.ua. ID ORSID: 0000-0001-6305-7918.

Павлусенко Ксенія Олександрівна, PhD студентка, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: pavlusenko8@kart.edu.ua. ID ORSID: 0009-0001-5072-8038.

Tetyana Petrenko, Ph.D., Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: petrenko_tg@kart.edu.ua. ID ORSID: 0000-0001-6305-7918.

Kseniia Pavlusenko, PhD student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: pavlusenko8@kart.edu.ua. ID ORSID: 0009-0001-5072-8038.