

FRI-10.326-1-EEEE-01

CONCEPT FOR DEVELOPING AN INTELLIGENT CIRCADIAN LIGHTING SYSTEM FOLLOWING THE BIOLOGICAL RHYTHM OF THE HUMAN BODY¹

Ventsislav Vasilev, PhD Student

Department of Electronics,
University of Ruse „Angel Kanchev”
Tel.: +359-878-657-228
E-mail: vvvasilev@uni-ruse.bg

Prof. Aneliya Manukova, DSc

Department of Electronics, Ruse,
University of Ruse „Angel Kanchev”
Tel.: +359 82-888-366
E-mail: amanukova@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Orlin Petrov, PhD

Department of Power Electrical Engineering,
University of Ruse „Angel Kanchev”
Tel.: +359 82-888-455
E-mail: opetrov@uni-ruse.bg

Abstract: *The publication presents the rationale for developing an intelligent circadian lighting system that follows the biological rhythm of the human body, aiming to alter the spectral emission of the light fixture and mimic the progression of natural light, thereby enhancing the active learning cycle. Light regulates human physiology and behavior, primarily the sleep-wake cycle, by directly stimulating the brain's internal timing mechanisms. People spend an average of 87% of their time indoors, and lighting should be designed to align with circadian rhythms. The proposed system provides an additional training environment and education –when designing the lighting of classrooms, the color of the generated light, related to the specifics of human vision, is of key importance. The parameters of the circadian rhythm and the effect of light on it are justified, and a concept for building an intelligent circadian lighting system is presented.*

Keywords: *Circadian rhythm, lighting, human eye, electronic system, learning.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното развитие на електронната техника е неразривно свързано с развитието и осъвременяването на интелигентни системи в полза на хората за тяхното нормално ежедневие, активност и социализиране. Безопасната и благоприятна среда за обучение винаги е определяща за ефективността на учебния и работния процеси. Осигуряването на необходимата среда в помещенията, изисква оптимално спазване на изискванията на охрана на труда според държавните нормативни документи и международни стандарти за здравословни и безопасни условия на труд.

¹ Докладът е представен на 25 октомври 2024 г. в секция „Електротехника, електроника и автоматика“ с оригинално заглавие на български език: **ОБОСНОВКА ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНА СИСТЕМА ЗА ЦИРКАДИЛНО ОСВЕТЛЕНИЕ, СЛЕДВАЩО БИОЛОГИЧНИЯ РИТЪМ НА ОРГАНИЗМА.**

Посредством модулите за мониторинг и контрол се наблюдават непрекъсваеми физически и електрически величини и се предоставя възможност за навременна оценка на текущото им състояние, което е предпоставка за оптимизиране на режимите им на работа и по-висока ефективност.

При проектирането на осветлението на учебните зали от съществено значение е цвета на генерираната светлина, свързано с особеностите на човешкото зрение. Човешкото око е адаптирано да функционира в условия на оптични лъчения, свързани с визуалните възприятия, което определя и влияние върху важни физиологични функции и ритми. При циркадилното осветление изкуствената светлина е максимално близка до естествената слънчева светлина като динамика и цветна температура.

Целта на изследването е обосновка за изграждане на иновативна система за циркадилно осветление с цел промяна на спектралното излъчване на осветителното тяло и имитиране хода на естествената светлина, съответно повишаване на активния цикъл на обучение.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Циркаден ритъм

Циркадният ритъм е всеки биологичен процес, който има ендогенно, подлежащо на адаптация, циклично поведение с период на цикъла около 24 часа, и е обусловен от продължителността на денонощието, като се проявява както при наличие, така и при липса на слънчева светлина. Терминът „циркаден“ произлиза от латинските думи *circa* (около или „приблизително“) и *diem* (ден). Човек обикновено изпитва симптоми на десинхроноза (джетлаг), преди да адаптира циркадния си ритъм и да го синхронизира спрямо светлината или часовата разлика.

Известно е, че светлината влияе върху човешката физиология и поведение и директно стимулира човешкия биологичен часовник, Фигура 1. Този ендогенен циркаден (24-часов) ритъм генерира дневните ритми на активност и почивка и е отговорен за модулирането на ежедневните ритми за различни физиологични явления, като цикъла сън–бодърстване, секрецията на хормони и субективната бдителност и ефективност при хората (Buijs, R.M. et al., 2003). Човешкото ежедневие се определя според слънцегреенето. Ежедневният модел светло–тъмно е в синхрон с 24-часовото въртене на Земята и определя биологичния часовник на човека (Dijk, D.J., 2005), (Lee, H.S, et al., 2003).



Фиг. 1. Циркаден ритъм

Съвременният начин на живот на обществото налага да синхронизира естественият модел с допълнителни фактори – днес човекът прекарва по-голямата част от времето си на закрито, средно 87%, (Kler eis, et al., 2001) и на работното си място. През деня светлинните нива на закрито обикновено са много по-ниски, отколкото на открито, докато вечерните нива на светлина (от източници на изкуствено осветление, смартфони, телевизори и др.), са относително високи. Съществена група са и хората, които забавят времето си за сън, за да се съобразят с работните графици и други социални ограничения. Всичко това се определя от силното несъответствие на начина на живот с естествената ендогенна циркадна ритмичност.

Авторите (Wittmann, M., et al., 2006) приемат, че световното население има социален джетлаг, т.е. циркаден ритъм, който е извън фаза с ежедневните графици на хората. Социалният джет-лаг индирект

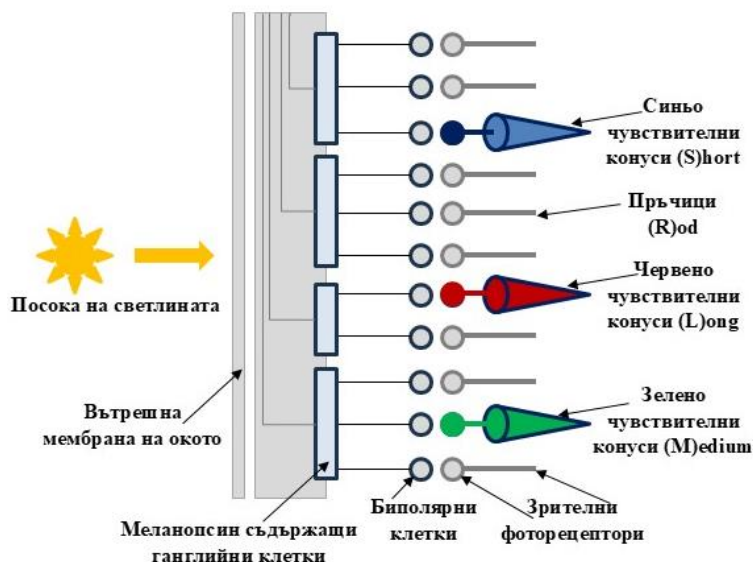
но нарушава естествения цикъл на биологичния часовник и може да има дълбоко въздействие върху психическото и физическото здраве на човек.

Съществуват множество проучвания, които свързват циркадните смущения с голямо разнообразие от рискове и заболявания за здравето, като разстройства на настроението, депресия, диабет, затлъстяване, сърдечно-съдови заболявания и рак (Antypa, N., et al., 2016), (Circadian Rhythms, 2019), (Stevens, R.G., 2009), (Reutrakul, S., et al., 2015), (Baron, K.G., et al., 2014). Въпреки нарастващо научно разбиране за въздействието на светлината върху биологичните механизми, подкрепено от проучвания за това как светлината предизвиква жизненост и бдителност по време на работните часове (Smolders, et al., 2013), (Smolders, et al., 2012), и ползите от това, все още не са изградени единни изисквания и практически системи. Реално осветлението на работното място е проектирано само да отговаря на нормативните изисквания, осигурявайки количеството светлина, подходящо и достатъчно, за могат хората да изпълняват определени задачи и да се намали зрителният дискомфорт. Много малко внимание се обръща на биологичните ефекти от светлината, и това как тя може да се използва за насърчаване на здравето и благосъстоянието на хората чрез циркадните функции, които регулират естествените ритми. Изкуствената светлина се използва като средство за модулиране на графици сън-бодърстване и за пренастройване на вътрешния човешки часовник с околната среда чрез фазово изместване на биологичния часовник. В зависимост от времето и степента на излагане на светлина, може да се ускори или забави фазата на биологичния часовник на човек. В резултат на това една интелигентна осветителна система ще промени вътрешното възприятие на човешкото тяло и потенциално ще подобри благосъстоянието по атрактивен начин.

Структура на човешкото око

Зрителният образ при човека се формира когато светлината премине през окото и достигне до неговата ретина. Светлината има различни функции – зрителна и незрителна, които въздействат върху човешкия организъм. Една от важните функции е промяна на вътрешния циркаден часовник за периодично редуване на сън с активно състояние на будност през деня.

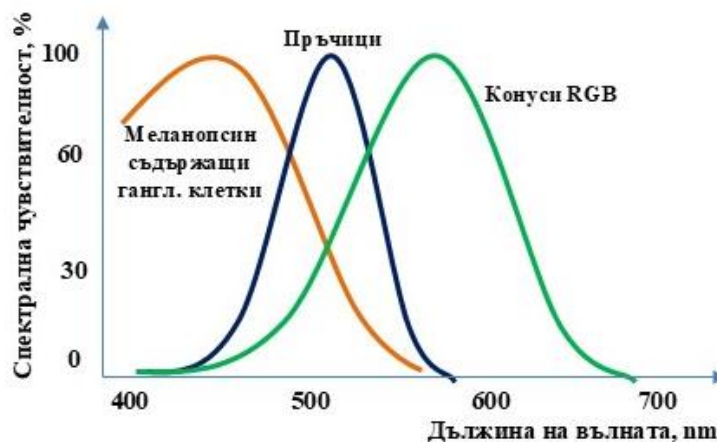
Структурата на човешкото око е представена на Фигура 2, и на Фигура 3 – спектралната чувствителност, както и визуализират зрителния процес.



Фиг. 2. Частична структура на човешкото око

Светлините фотони влизат в окото през очната леща, достигат ретината на окото и преминават през слой от ганглийни клетки, след това слой от хоризонтални и биполярни клетки и достигат до зрителните фоточувствителни пръчици и конуси, които ги превръщат в електрически импулс (Figueiro, M., et al., 2019) чрез веществото йодопсин. След възбуждане пръчиците и конусите предават сигнал през по-горния слой клетки към ганглийните, а те от своя страна се свързват с различни центрове на мозъка (Kandilarov R.,

2018). Част от ретинални ганглийни клетки, до 5%, съдържат веществото меланопсин, което определя тяхната фоточувствителност. До момента са известни няколко вида силно чувствителни ретинални ганглийни клетки (Kandilarov R., 2018), (Kandilarov, R., 2016), на Фигура 3 светлочувствителността е от 440 nm до 480 nm (S. M. Pauley., 2004), (Melyan Z. et al., 2005).



Фиг. 3. Спектрална чувствителност на ретинални ганглийни клетки, съдържащи меланопсин в сравнение със спектрална чувствителност на окото през нощта и през деня

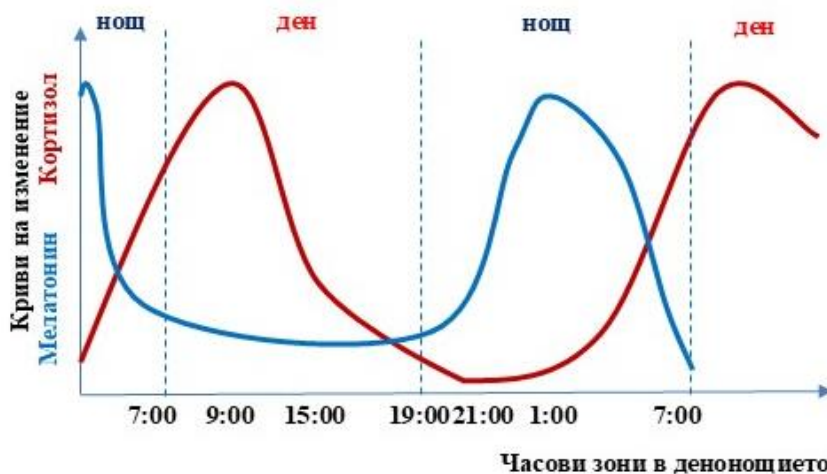
При попадане на светлина върху меланопсина в тези ганглийни клетки се образува директен електрически импулс, който се препраща към мозъка, без да е активирана зрителна клетка. Именно този директен механизъм участва в процеси, регулиращи секрецията на хормона мелатонин, и директно влияе върху диаметъра на зеницата на окото (Kandilarov R., 2018), (Kandilarov, R., 2016).

Ефект на светлината върху циркадния ритъм и съня

Циркадният часовник контролира съществени функции, като метаболитните цикли, хормонални промени, будност и сън. Правилната синхронизация между вътрешния часовник и външните светлинни стимули е от съществено значение за оцеляването при организмите (S. M. Pauley., 2004). За появата на нужда от сън има и естествен механизъм на натрупване на умора в организма, но той е еднакво важен с циркадния стимул и заедно определят продължителността на съня.

Взаимодействието между вътрешния часовник и външните светлинни стимули обяснява избора на осветеността при хората, свързани с работа на смени, скъсяване на светлата част от деня през зимата и пътувания, сменящи часови зони, и появяващите се здравословни промени, засягащи психично здраве, сезонни и постоянни депресии, когнитивна дисфункция и др. (S. M. Pauley., 2004).

За човешкия организъм естествената промяна в светлината през денонощието има значителен ефект. Когато слънцето започне се изкачва сутрин високо в небето, спектралният състав на светлината става по-интензивен в синята част на спектъра. Попадайки в окото, такава светлината стимулира меланопсин-съдържащите ганглийни клетки, чувствителни именно в тази област (440÷480 nm) (Seithikurippu R. et al., 2017), което автоматично активира конкретен център в мозъка *suprachiasmatic nucleus* (SCN) и се стимулира епифизата, като съответно се потиска синтеза на мелатонин и повишава общото ниво на будност. С намаляването на мелатонина се повишава нивото на хормона кортизол (Фигура 4) – хормон на стреса, чрез който се регулира кръвното налягане и функциите на сърдечно-съдовата система (N. Zisapel., 2018).



Фиг. 4. Схема на промяна в нивата на кортизол и мелатонин при естествен денонощен ход на светлината

При спускане на слънцето към хоризонта светлина от него преминава през по-дебел слой от въздух и започва да намалява общата интензивност на синята компонента в светлинния спектър, съответно процесът на потискане на мелатониновата секреция отслабва и нивата на хормона започват постепенно да се повишават, докато тези на кортизола започват да намаляват (фигура 4). Сърдечният ритъм се забавя, телесната температурата намалява и тялото се подготвя за сън (Seithikurippu R. et al., 2017).

Естественният циркаден ритъм се променя с възрастта по различен начин. Новородените започват да показват наличие на циркаден ритъм още към края на неонаталния си период (около 3-и месец). При 13–18-годишните мелатониновата секреция естествено закъснява и това отнема времето за лягане и съответно ставане. Научни анализи показват, че в училища, променили часа на започване на занятията си дори само с 30 минути, по-късното ставане на младите подобрява съня и бодростта им, а с това и способността за учене. Отделно се намаля нивото на депресивни състояния.

С напредване на възрастта организмът започва да губи ретинални ганглийни клетки, цялостната невронна активност спада, а секрецията на мелатонин започва да намаля, като така отслабва продължителността на ефективния сън и нараства предразположеността към депресивни заболявания.

Остаряването на зрителния орган при хората води и до други циркадни промени. Поради пожълтяване пропускливостта в синята спектрална област спада, като при възрастните хора биологичният ефект от светлина с интензивна синя компонента намалява чувствително. От това следва, че при възрастните хора за постигане на същия биологичен ефект са необходими по-високи осветености, отколкото при млади хора (Kandilarov R., 2018), (Kandilarov, R., 2016).

Потребителско предпочитание

Предполага се, че осветлението осигурява ниво на комфорт и е съществен фактор за производителността и безопасността в професионални условия. Тоест, циркадното осветление не може да се разглежда като изолиран обект, но трябва да се отчете връзката му с остри визуални ефекти на светлината.

Структурата на зрителната система е еднаква за всички, но има индивидуални различия между отделните хора – различна чувствителност към светлина, различни рефракционни грешки като миопия, далекогледство, астигматизъм и пресбиопия. В резултат на това предпочитаните нива на осветеност варират значително сред отделните хора, в зависимост от фактори като пол, възраст и култура (Veitch, J.A., 2001), (Newsham, V. Reinhart., 2000).

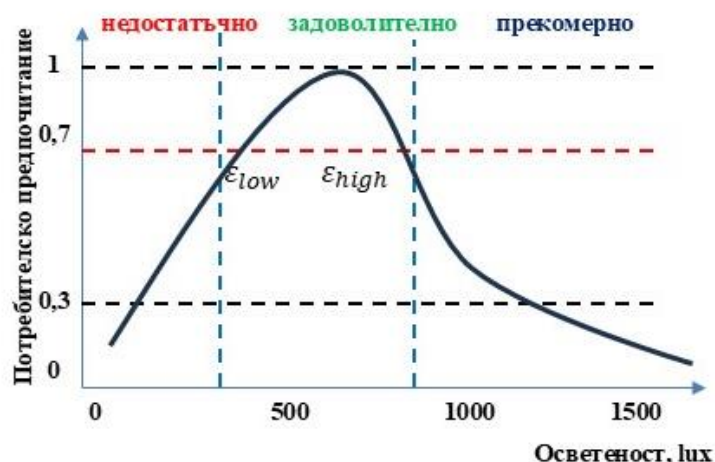
Анализът на качествено влияние на светлината за здравето и работоспособността е необходимо да се извърши чрез количествен модел и технически да се реши субективното усещане на хората в количествени измерители.

Количественият модел за удовлетвореност на хората за светлина е разработен от авторите в (Wang, X., et al., 2012). Според закона на Фехнер окото усеща яркостта приблизително логаритмично в умерен диапазон и така хората моделират удовлетворението на потребностите си като функция на средната осветеност на зоната като логаритмична норма (Paratsimpa C, et al., 2020) чрез израз (1):

$$U(x) = \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\ln(\varepsilon))^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

където ε съответства на най-предпочитаната от потребителя осветеност, σ описва толерантността към осветеност на всеки индивид.

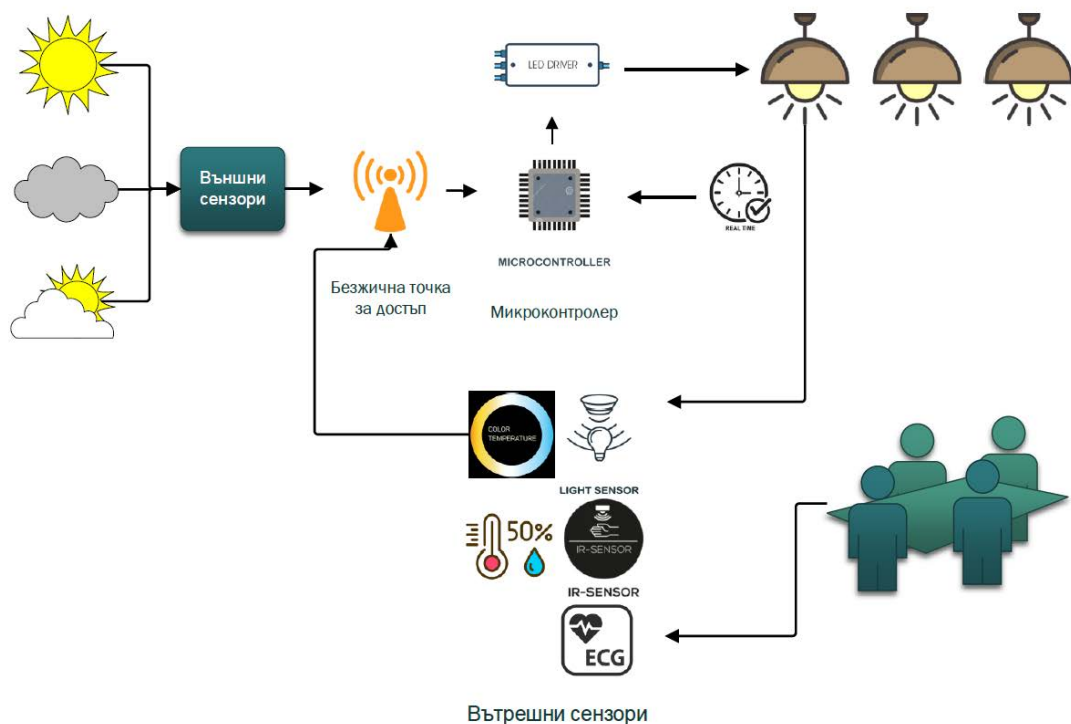
Както се вижда на Фигура 5 кривата на удовлетворение позволява да се интерпретира естествено удовлетвореността на потребителите като вероятност за приемане на осветителната система. Разумно е да се предположи, че индивидуалният потребител е доволен от интервал на осветеност $\varepsilon_{low} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{high}$. За да определите ниско и високо ниво се моделира наличието на праг на удовлетвореност. Осветеност x се счита за „задоволителна“, ако и само $U(x) \geq \gamma$ и $\gamma = 0,7$. По подобен начин се извежда вероятността x и се възприема като „недостатъчна“ или „прекомерна“, съответно под или над праговете на осветеността ε .



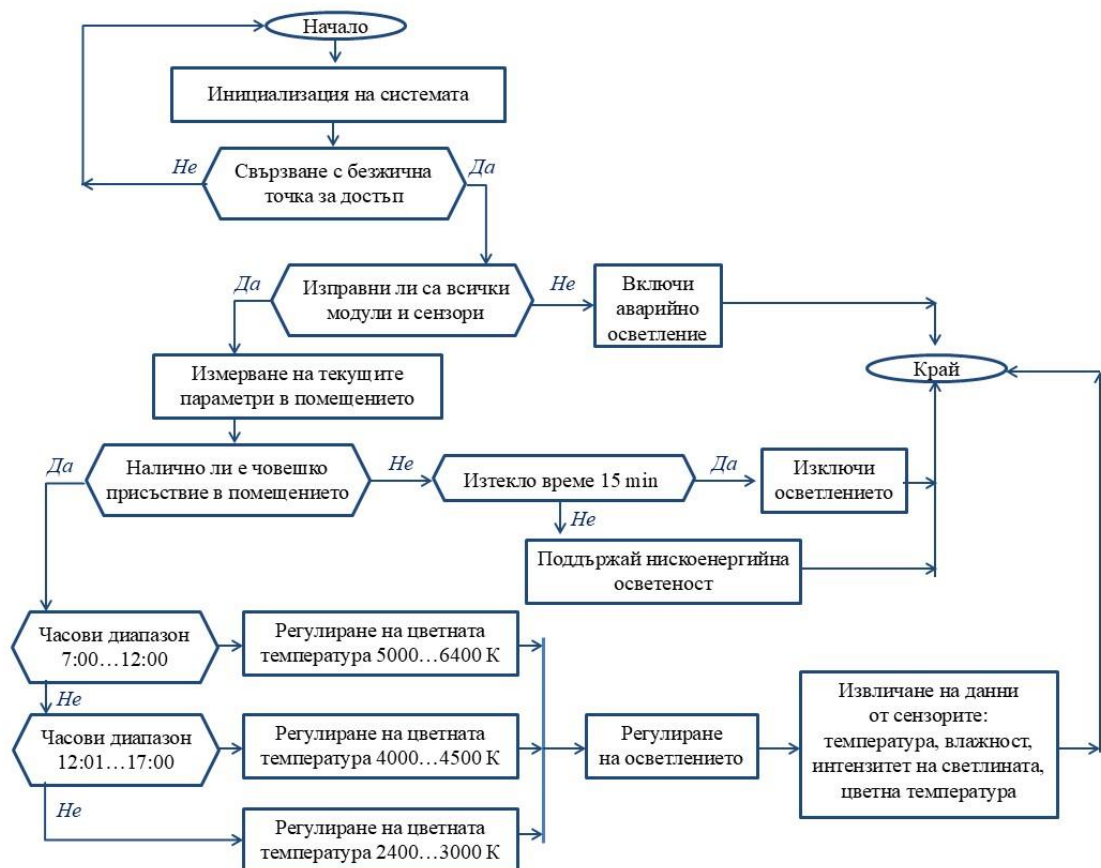
Фиг. 5. Лог-нормален модел на потребителско удовлетворение с предпочитана осветеност при 500 lx. $U(x) \geq \gamma$ и $\gamma = 0,7$.

В. Концепция за изграждане на иновативна система за циркадилно осветление, следващо биологичния ритъм на човешки организъм

На базата на представения анализ на съществуващите методи и използвани принципи за влияние на осветлението върху циркадния ритъм на човек е разработена блокова схема и алгоритъм на работа на иновативна система за циркадилно осветление, следващо биологичния ритъм на организма (Фигура 6 и Фигура 7). Разработената система за циркадилно осветление се базира на централен микроконтролер, който комуникира с вътрешни и външни сензори, свързани към нея посредством безжична точка за достъп.



Фиг. 6. Блокова схема на иновативна система за циркадилно осветление



Фиг. 7. Алгоритъм на работа на иновативна система за циркадилно осветление, следващо биологичния ритъм на организма

Външните сензори осигуряват информация за условията на околната среда, включително интензитет на външната светлина и температура, които са критични за адаптивното регулиране на вътрешното осветление.

Вътрешните сензори следят параметри като присъствие, температура и осветеност в помещението, което позволява динамично адаптиране на цветната температура и осветеността.

Централният микроконтролер управлява осветителните тела въз основа на събраните данни, като регулира светлинния спектър и интензитет в реално време. Тази архитектура позволява системата автоматично да променя светлинните условия през деня, за да симулира естествения дневен цикъл на слънчевата светлина и да подпомага циркадните ритми на потребителите. Допълнително, чрез интеграцията на безжична точка за достъп, системата се управлява дистанционно, което предоставя възможност за оптимизация и персонализация на настройките според нуждите на конкретни помещения и времеви периоди.

Основният приоритет при проектирането на системата е осигуряването на благоприятна и здравословна среда за потребителите, която подпомага техния циркаден ритъм и повишава общото им благосъстояние. Енергийна ефективност също е постигната, като бонус към основната функция на системата, чрез използването на сензори за присъствие, които автоматично изключват осветлението при липса на хора в помещението. Това намалява ненужния разход на енергия и удължава живота на осветителните тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Светлината регулира човешката физиология и поведение, най-вече цикъла на сън и будност, чрез пряко стимулиране на вътрешните механизми на времето в мозъка. Тъй като хората прекарват над 90% от времето си на закрито, осветлението в строената среда трябва да бъде проектирано, за да влияе на циркадните ритми.

Представена е обосновка на интелигентна система за управление на офисното осветление, ориентирана към човека, която цели да подкрепи човешката циркадна биология и здраве. Съвременният начин на живот е характеризирен от несъответствие между циркадните и социалните (например, работни, училищни) часовници, състояние известно като социален джетлаг, което може да има сериозни последици за здравето и благополучието ни.

Предлага се използването на офисно осветление за намаляване на социалния джетлаг чрез ефективно изместване на циркадния часовник на учащи и служителите. Системата за управление на осветлението е формулирана като ограничен проблем на оптимизация, при който минимизирането на социалния джетлаг, измерен като разликата между спонтанните времена на събуждане и алармата на потребителя, се използва като метрика за представяне.

Този проблем на оптимизация е силно нелинеен поради сложната динамика на външните фактори, въздействащи върху циркадните ритми, както и поради многовариантните зависимости между сензорните данни, използвани от системата. Решението на този нелинеен оптимизационен проблем изисква прилагането на адаптивни алгоритми за машинно обучение, които извършват непрекъснат мониторинг и анализ на сензорни величини, като светлинна интензивност, цветна температура, температура и влажност на околната среда. Това позволява прецизно регулиране на светлинния спектър и интензитет в реално време, осигурявайки оптимални условия за ефективност и комфорт в работната и учебната среда.

REFERENCES

Antypa, N.; Vogelzangs, N.; Meesters, Y.; Schoevers, R.; Penninx, B.W. (2016) Penninx, Chronotype Associations with Depression and Anxiety Disorders in a Large Cohort Study. *Depress. Anxiety* 2016, 33, 75–83.

- Baron, K.G.; Reid, K.J. (2014) Circadian misalignment and health. *Int. Rev. Psychiatry* 2014, 26, 139–154.
- Buijs, R.M.; van Eden, C.G.; Goncharuk, V.D.; Kalsbeek, A. (2003) The biological clock tunes the organs of the body: Timing by hormones and the autonomic nervous system. *J. Endocrinol.* 2003, 177, 17–26.
- Circadian Rhythms and Bipolar Disorder | Brain & Behavior Research Foundation. (2019) Available online: <https://www.bbrfoundation.org/event/circadian-rhythms-and-bipolar-disorder> (accessed on 13 December 2019).
- Dijk, D.J.; von Schantz, M. (2005) Timing and Consolidation of Human Sleep, Wakefulness, and Performance by a Symphony of Oscillators Sleep and Wake Cycles are Highly Consolidated Complex States. *J. Biol. Rhythms*, 2005, 20, 279–290.
- Figueiro, M.; Kalsher, M.; Steverson, B.; Heerwagen, J.; Kampschroer, K.; Rea, M. (2019) Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Light. Res. Technol.* 2019, 51, 171–183.
- Kandilarov R. (2018). LED Lamp with Customizable Light Regimes for Horticulture Applications 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics - ET, doi: 10.1109/ET.2018.8549613
- Kandilarov, R. (2016). Digitally controlled 4-channel constant current source for LED luminary based on PIC microcontroller 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2016, doi: 10.1109/SIELA.2016.7543016
- Klepeis, N.E.; Nelson, W.C.; Ott, W.R.; Robinson, J.P.; Tsang, A.M.; Switzer, P.; Behar, J.V.; Hern, S.C.; Engelmann, W.H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 2001, 11, 231–252.
- Lee, H.S.; Billings, H.J.; Lehman, M.N. (2003) The suprachiasmatic nucleus: A clock of multiple components. *J. Biol. Rhythms* 2003, 18, 435–449.
- Melyan Z. et al. (2005) Addition of human melanopsin renders mammalian cells photoresponsive. In: *Nature* 433 (2005), pp. 741–745. DOI:10.1038/nature03344.
- Newsham, V. Reinhart. (2000) Preferred luminous conditions in open-plan offices: Research and practice recommendations. *Int. J. Light. Res. Technol.* 2000, 30, 199–212.
- Papatsimpa C, Linnartz JP. (2020) Personalized Office Lighting for Circadian Health and Improved Sleep. *Sensors* (Basel). 2020 Aug 14;20(16):4569. doi: 10.3390/s20164569. PMID: 32824032; PMCID: PMC7472178.
- Pauley S. M. (2004) Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue". In: *Medical hypotheses* 63.4 (2004), pp. 588–596. DOI: 10.1016/j.mehy.2004.03.020.
- Reutrakul, S.; Knutson, K.L. (2015) Consequences of circadian disruption on cardiometabolic health. *Sleep Med. Clin.* 2015, 10, 455–468.
- Seithikurippu R. Pandi-Perumal et al. (2017) Melatonin and Human Cardiovascular Disease". In: *Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics* 22.2 (2017), pp. 122–132. DOI: 10.1177/1074248416660622.
- Smolders, K.C.H.J.; De Kort, Y.A.W.; van den Berg, S.M. (2013) Daytime light exposure and feelings of vitality: Results of a field study during regular weekdays. *J. Environ. Psychol.* 2013, 36, 270–279.
- Smolders, K.C.H.J.; de Kort, Y.A.W.; Cluitmans, P.J.M. (2012) A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiol. Behav.* 2012, 107, 7–16.
- Stevens, R.G. (2009) Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: Assessment of existing evidence. *Int. J. Epidemiol.* 2009, 38, 963–970.

Veitch, J.A. (2001) Psychological Processes Influencing Lighting Quality. *J. Illum. Eng. Soc.* 2001, 30, 124–140.

Wang, X.; Jalalirad, A.; Tjalkens, T.; Linnartz, J.P. (2012) Modeling of Comfortable and Energy-Efficient Light Distributions for an Indoor Environment. In *Proceedings of the Experiencing Light 2012: International Conference on the Effects of Light on Wellbeing*, Eindhoven, The Netherlands, 12–13 November 2012.

Wittmann, M.; Dinich, J.; Mellow, M.; Roenneberg, T. (2006) Social jetlag: Misalignment of biological and social time. *Chronobiol. Int.* 2006, 23, 497–509.

Zisapel N. (2018) New perspectives on the role of melatonin in human sleep, circadian rhythms and their regulation. In: *Br. J. Pharmacol.* (Jan. 2018), DOI: 10.1111/bph.14116.