

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОТО ЛЪЧЕНИЕ НА ВРЕДНАТА СИНЯ СВЕТЛИНА НА LED ОСВЕТИТЕЛИ ЗА ВЪТРЕШНО ПРИЛОЖЕНИЕ

Веселина Стефанова^{1,2}, Пламен Цанков^{1,2}, Милко Йовчев^{1,2},
Христо Ибришимов^{1,2}, Ивайло Стоянов^{1,2}, Иван Ракаджиев¹

¹Технически университет – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България

²Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

*кореспондиращ автор: myovchev@tugab.bg

STUDY OF THE BLUE LIGHT HAZARD EFFICACY OF LUMINOUS RADIATION IN INDOOR LED LUMINAIRES

Veselina Stefanova^{1,2}, Plamen Tsankov^{1,2}, Milko Yovchev^{1,2}, Hristo Ibrishimov^{1,2},
Ivaylo Stoyanov^{1,2}, Ivan Rakadzhiev¹

¹Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria

²Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

*Corresponding author: myovchev@tugab.bg

Abstract

The present study analyzes the relationship between the efficacy of harmful radiation in the blue light region and the correlated colour temperature of various LED luminaires for offices and industrial halls. Results are presented in tabular and graphical form, derived from spectroradiometer measurements of spectral emission and an assessment of the effective blue light radiation for the studied LED luminaires with different luminous flux and different correlated colour temperature.

Keywords: blue light hazard; LED luminaires; spectroradiometer; luminous radiation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното електрическо осветление за вътрешно приложение се изпълнява предимно от светодиодни (LED) източници, с които може да се постигне високо светлоотдаване η , възможност за регулиране на светлинния поток Φ и на корелираната цветна температура T_{cp} . В зависимост от химичния състав на LED източниците, се произвеждат осветители с различен спектрален състав на бялата светлина – топлобяла $T_{cp} \leq 3500$ К, неутрална $T_{cp} = (4000 \div 4500)$ К и студено-

бяла $T_{cp} > 4500$ К светлина [1, 2, 3].

Корелираната цветна температура и нивото на осветеност имат важни функции при проектирането на биологично въздействащо осветление на закрито. Излъчването с дължина на вълната $\lambda < 350$ nm съдържа най-голяма енергия от видимия спектър, но се поглъща от лещата и роговицата и не достига до ретината. Излъчването с дължина на вълната $\lambda > 500$ nm съдържа сравнително ниска енергия, за да предизвика фотохимични реакции, като има топлинен ефект. Си-

нята светлина, във вълновия диапазон $\lambda=(435 \div 440)$ nm, съдържа достатъчно енергия и достига ретината, като предизвиква фото-химични реакции и увреждане на фоторецепторите (конуси и пръчици). Същевременно синята светлина оказва влияние на циркадния ритъм, като потиска отделянето на мелатонин в човешкия организъм и понижава нивото на сънливост през тъмната част от денонощието [4, 5, 6].

Един от количествените показатели, даващи информация за потенциалната опасност от спектъра на даден светлинен източник, е показателят *ефективност на светлинното излъчване на вредната синя светлина* $K_{B,V}$ в $[W_B/lm]$, който се определя с израза:

$$K_{B,V} = \frac{\int \Phi(\lambda) B(\lambda) d\lambda}{K_m \int \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

където: $\Phi(\lambda)$ – спектрална интензивност на излъчване на светлинния източник, в $[W/nm]$; λ – дължина на вълната, в $[nm]$; $B(\lambda)$ – функция на вредната синя светлина, която е дефинирана от IEC 62471; $K_m = 683 \text{ lm/W}$ – максимална светлинна ефективност на фотопичното зрение на човешкото око при монохроматично излъчване с $\lambda = 555 \text{ nm}$; $V(\lambda)$ – относителна спектрална светлинна ефективност за фотопично зрение, като $V(\lambda) = 1$ при $\lambda = 555 \text{ nm}$.

Настоящият доклад представя резултати от изследване с помощта на спектрорадиометър в акредитирана светлотехническа лаборатория на ефективното излъчване на вредната синя светлина на LED осветители за вътрешно приложение с различен светлинен поток и различна корелирана цветна температура.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В Технически университет – Габрово към Център за компетентност функционира акредитирана от 2024 г. светлотехническа лаборатория за изпитване на

лампи и осветители. За целта на изследванията, в лабораторията се извършва измерване на спектралния състав на излъчване, на цветовите характеристики и на общия светлинен поток на LED осветители със CCD спектрорадиометър LMS-9000B, интегрираща сфера с диаметър 2 m с геометрична конфигурация от тип 4π и специализиран софтуер за обработване на резултатите. Външният вид на измервателното оборудване е показано на фиг. 1 [7].



Фиг. 1. Външен вид на спектрорадиометър LMS-9000B, използван за изследванията

Изследването на ефективността на светлинното излъчване на вредната синя светлина се извършва за следните осветители:

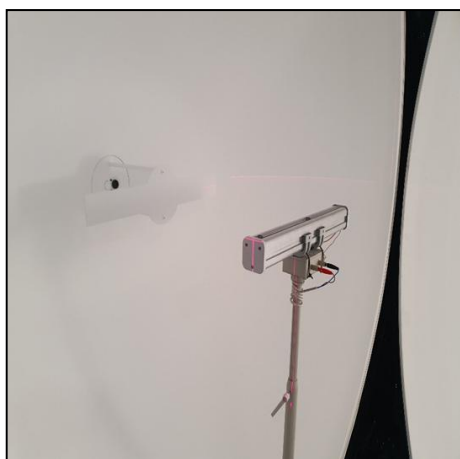
- ретрофит (конвенционално тяло с нов тип лампи) LED осветител (фиг. 2), от тип 600×600 mm, със сменяеми 4 броя LED тръби, който има обявена обща активна мощност $P = 36 \text{ W}$ (условно означен в доклада като осветител № 1);
- индустриален линейен LED осветител (фиг. 3) с обявена активна мощност 40 W (осветител № 2);
- индустриален LED осветител с осева симетрия (фиг. 4), тип „камбана“ (high-bay), с обявена активна мощност 120 W (осветител № 3).

На фиг. 2, 3 и 4 са показани изследваните LED осветители, които се позиционират с помощта на лазер и се електрозахранват във фотометричния център на спектрорадиометъра. За всеки един от осветителите се измерват общия светлинен поток Φ , координатите на цветност x , y и u , v , корелираната цветна темпера-

тура T_{cp} , частни индекси на цветопрдаване (от $R1$ до $R15$), както и общият индекс на цветопрдаване R_a .



Фиг. 2. Изследван LED осветител № 1



Фиг. 3. Изследван LED осветител № 2

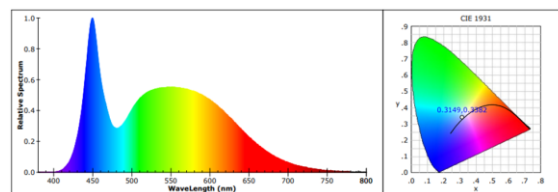


Фиг. 4. Изследван LED осветител № 3

LED осветителят, показан на фиг. 2, се използва предимно в офисните помещения на обществени, административни и индустриални обекти.

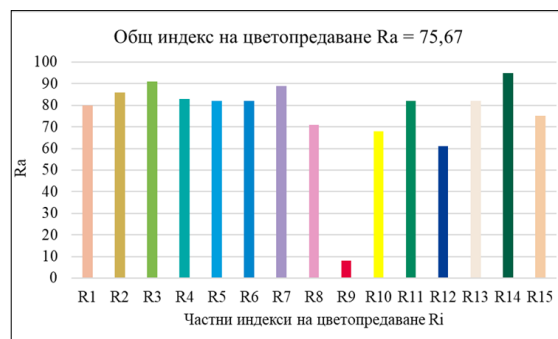
На фиг. 5 са показани спектралната интензивност на излъчване и координатите на цветност x, y по цветова диагра-

ма на CIE от 1931 г. за ретрофит LED осветител (№ 1).



Фиг. 5. Спектрален състав и координати на цветност на LED осветител № 1

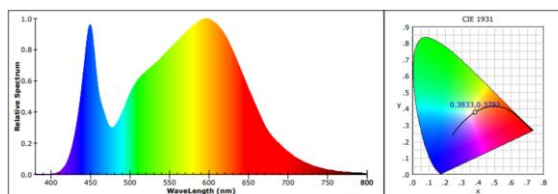
На фиг. 6 за същия са показани измерените частни индекси на цветопрдаване от $R1$ до $R15$ и изчислен общия индекс на цветопрдаване R_a .



Фиг. 6. Частни индекси и общ индекс на цветопрдаване за LED осветител № 1

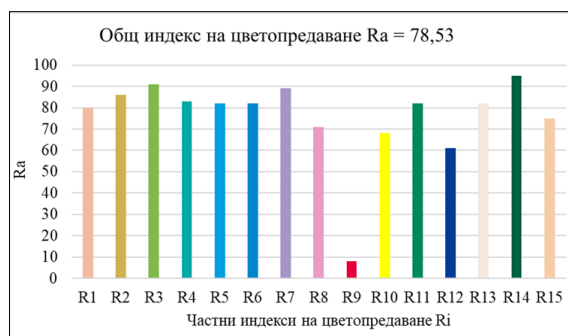
Измереният общ светлинен поток на изследвания ретрофит LED осветител (осветител № 1) в спектрометричната сфера е $\Phi = 2699,05 \text{ lm}$; светлоотдаването е $\eta = 75,67 \text{ lm/W}$ – сравнително ниско за съвременните изисквания за ефективност.

На фиг. 7 са показани спектралната интензивност на излъчване $\Phi(\lambda)$ и координатите на цветност x, y за индустриален линейен LED осветител (осветител № 2).



Фиг. 7. Спектрален състав и координати на цветност на LED осветител № 2

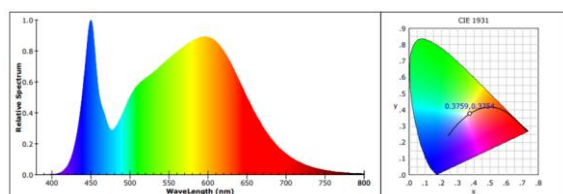
На фиг. 8 за същия осветител са показани измерените частни индекси на цвето предаване от $R1$ от $R15$ и изчислен общия индекс на цвето предаване R_a .



Фиг. 8. Частни индекси и общ индекс на цвето предаване за LED осветител № 2

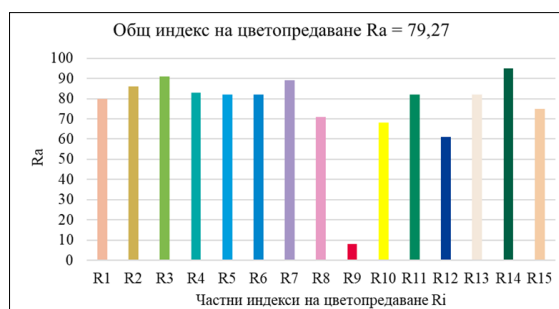
Измереният общ светлинен поток на индустриалния линейен LED осветител (№ 2) в спектро радиометъра с интегриращата сфера е $\Phi = 3557,15$ lm; светлоотдаването е $\eta = 91,05$ lm/W.

На фиг. 9 са показани спектралната интензивност на излъчване и координатите на цветност за индустриален LED осветител с осева симетрия (№ 3).



Фиг. 9. Спектрален състав и координати на цветност на LED осветител № 3

На фиг. 10 за същия са показани измерените частни индекси на цвето предаване от $R1$ от $R15$ и изчислен общия индекс на цвето предаване R_a .



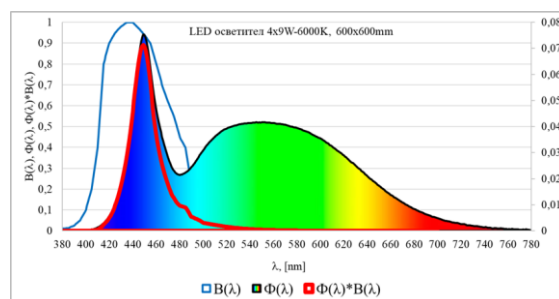
Фиг. 10. Частни индекси и общ индекс на цвето предаване за LED осветител № 2

Измереният общ светлинен поток на изследвания индустриален LED осветител (№ 3) е $\Phi = 12542,39$ lm; светлоотдаването на осветителя е $107,36$ lm/W.

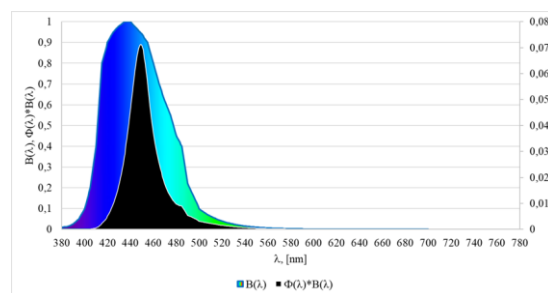
След извършване на измерванията на изследваните осветители, в специализиран модул на MS Excel се въвеждат стойностите на спектралната интензивност на излъчване на светлинния източник $\Phi(\lambda)$, относителната спектрална светлинна ефективност за фотопично зрение $V(\lambda)$ и стойностите на тегловната функция на опасната синя светлина $B(\lambda)$ [4, 7, 8, 9].

Графичното представяне на функциите $\Phi(\lambda)$, $V(\lambda)$, $B(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda) \cdot B(\lambda)$ за изследвания ретрофит LED осветител (осветител № 1) е показано на фиг. 11, 12 и 13 [8, 10, 11].

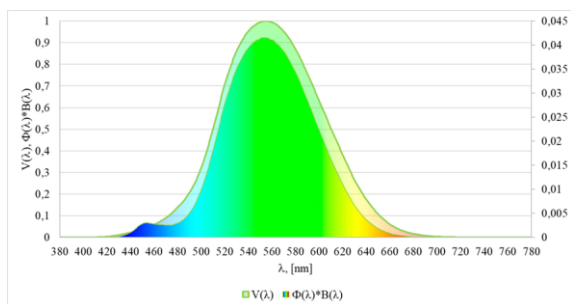
Графичното представяне на функциите $\Phi(\lambda)$, $V(\lambda)$, $B(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda) \cdot B(\lambda)$ за изследвания индустриален линейен LED осветител (осветител № 2) е показано на фиг. 14, 15 и 16.



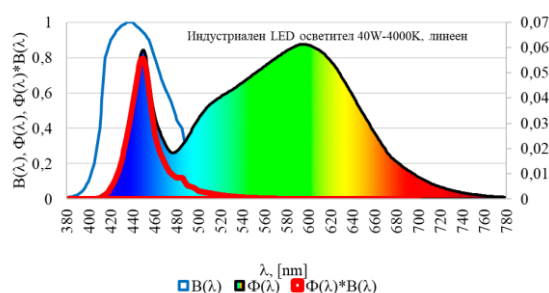
Фиг. 11. Графично представяне на $B(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda) \cdot B(\lambda)$ за изследван LED осветител № 1



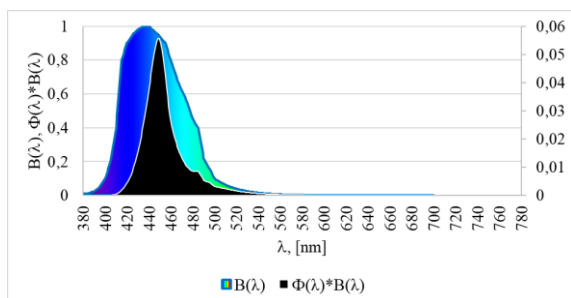
Фиг. 12. Графично представяне на $B(\lambda)$ и $\Phi(\lambda) \cdot B(\lambda)$ за LED осветител № 1



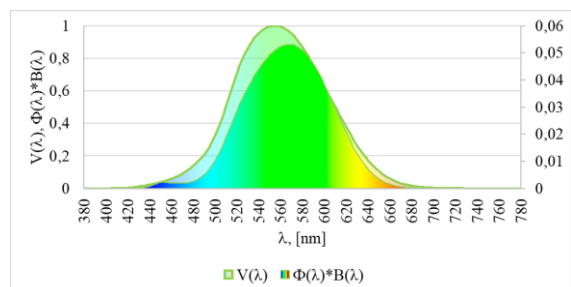
Фиг. 13. Графично представяне на $V(\lambda)$ и $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за LED осветител № 1



Фиг. 14. Графично представяне на $B(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за изследван LED осветител № 2



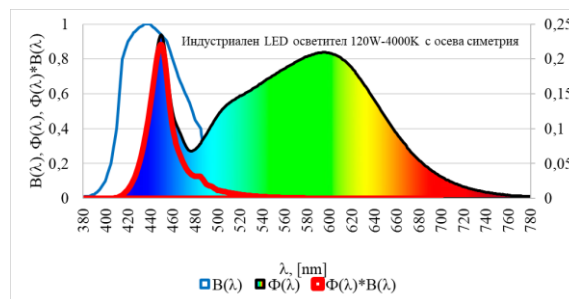
Фиг. 15. Графично представяне на $B(\lambda)$ и $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за LED осветител № 2



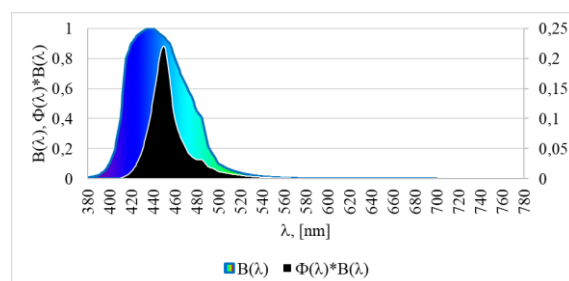
Фиг. 16. Графично представяне на $V(\lambda)$ и $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за LED осветител № 2

На фиг. 17, 18 и 19 в графичен вид е представено изменението на функциите

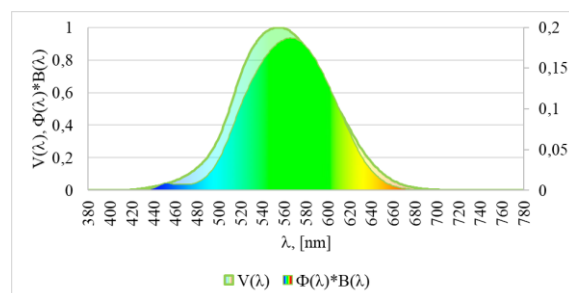
$\Phi(\lambda)$, $V(\lambda)$, $B(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за изследвания индустриален LED осветител с осева симетрия (осветител № 3).



Фиг. 17. Графично представяне на $B(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$ и произведението $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за изследван LED осветител № 3



Фиг. 18. Графично представяне на $B(\lambda)$ и $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за LED осветител № 3



Фиг. 19. Графично представяне на $V(\lambda)$ и $\Phi(\lambda)*B(\lambda)$ за LED осветител № 2

След въвеждане на спектрална интензивност на излъчването на лъчистия поток $\Phi(\lambda)$ за всеки от изследваните три LED осветителя, се изчислява показателят ефективност на светлинното излъчване на вредната синя светлина $K_{B,V}$ в $[W_B/lm]$, изчислен с формула (1).

В табл. 1 са представени резултати от измерения общ светлинен поток Φ , измерената корелирана цветна температура T_{cp} и изчислен показател за ефек-

тивност на вредната синя светлина $K_{B,V}$ за изследваните три LED осветителя.

Табл. 1. Ефективност на излъчване на вредна синя светлина на изследваните LED осветители

LED осветител	Φ [lm]	T_{cp} [K]	$K_{B,V}$ [W _v /lm]
№ 1	2699,05	6330	$8,15 \cdot 10^{-4}$
№ 2	3557,15	3943	$5,01 \cdot 10^{-4}$
№ 3	12542,39	4118	$5,26 \cdot 10^{-4}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на извършеното изследване на цветовите характеристики и на ефективното лъчение на вредната синя светлина на три вида LED осветители за вътрешно приложение със спектрорадиометър и интегрираща сфера, могат да се направят следните по-съществени заключения.

Трите LED осветителя имат общ индекс на цвето предаване $R_a < 80$, който принадлежи към степен 2 и не се препоръчва за помещения с повишени изисквания към цвето предаването, за които трябва $R_a > 90$. Частният индекс на цвето предаване R_9 (наситено червено) има много ниска стойност и за трите осветителя – $R_9 < 10$ (фигури 6, 8 и 10).

Показателят за ефективност на вредната синя светлина $K_{B,V}$ зависи от корелираната цветна температура – той е най-висок за LED осветител № 1, който има и най-висока корелирана цветна температура ($T_{cp} = 6330$ K – студенобяла светлина – табл. 1).

Индустриалните LED осветители № 2 и № 3 имат приблизително еднаква стойност на корелираната цветна температура ($T_{cp} \approx 4000$ K – неутрална бяла светлина), но различен светлинен поток. Стойността на $K_{B,V}$ е по-висока за LED осветител № 3, който има значително по-голям светлинен поток в сравнение с LED осветител № 2 (табл. 1).

От изложеното може да се направи извод, че е важно измерването и контролирането на цветовите характеристики

на LED осветителите, свързани с вярното възпроизвеждане на цветовете на обектите. Ефективността на вредната синя светлина във вълновия диапазон $\lambda = (435 \div 440)$ nm зависи както от корелираната цветна температура, така и от спектрална интензивност на излъчване на осветителите.

Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност,, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhang, J., W. Guo, B. Xie, X. Yu, X. Luo, T. Zhang, Z. Yu, H. Wang, X. Jin, Blue Light Hazard Optimization for White Light-Emitting Diode Sources with High Luminous Efficacy of Radiation and High Color Rendering Index, Optics & Laser Technology, Vol. 94, Elsevier, 2017, pp 193-198, ISSN 0030-3992, doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.031.
- [2] W. Tang, J. G. Liu and C. Shen, Blue Light Hazard Optimization for High Quality White LEDs, IEEE Photonics Journal, Vol. 10 (5), 2018, pp. 1-10, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2867822.
- [3] Tsankov, P., M. Yovchev, Lighting and Electrical Installation Technology, V. Aprilov press, Gabrovo, 2024, ISBN: 978-954-683-701-1.
- [4] IEC 62471:2006/CIE S 009:2002 - Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems.
- [5] Tsankov, P., V. Stefanova, M. Yovchev, I. Stoyanov, Measurement and Analysis of the Blue Light Hazard Efficacy of Luminous Radiation of Indoor LED Lamps, Eight Junior Conference on Lighting, Lighting 2023, Sozopol, Bulgaria, 23-21 September 2023, ISBN 979-8-3503-2829-5, pp. 1-4, doi: 10.1109/Lighting59819.2023.10298842.
- [6] Sims, P. Safety - Understanding IEC 62778 and Using $K_{v,B}$ to Calculate White Light Eye Safety Risk Groups, LUMINUS, 2022.

- [7] Tsankov, P., V. Stefanova, M. Yovchev, I. Stoyanov. Measurement and Analysis of the Spectral Emission of Different Types of Domestic Lamps in the Blue Light Hazard Wavelength Range. Contemporary Materials, XV-1 (2024), pp. 9-18, ISSN 1986-8677.
- [8] Nikolova, K., I. Petrinska, D. Ivanov, D. Pavlov, Investigation of the Photobiological Risk from Blue Light of a Human-Centric Lighting System - Case Study, 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), IEEE, Varna, Bulgaria, 2019, ISBN:978-1-7281-2697-5, doi: 10.1109/BulEF48056.2019.9030800.
- [9] Pawlak, A. Evaluation of the Hazard Caused by Blue Light Emitted by LED Sources. Lighting Conference of the Vise-grad Countries (Lumen V4), 2018.
- [10] Ye, L., et al. Phosphor-Converted Laser-Based Illuminant with High Color Rendering Index and Low Blue. IEEE Photonics Journal, Vol. 14, 2022, ISSN: 1943-0655, doi: 10.1109/JPHOT.2023.3234505.
- [11] Tsankov, P.T. (2020), Lighting Technologies. In: Pavlovic, T. (eds), The Sun and Photovoltaic Technologies, Green Energy and Technology, Springer International Publishing, 2020, pp. 213–270, ISBN: 3030224023.