

Головний редактор:

*П.І. Неежмаков, д-р техн. наук, проф.,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*

Заступник головного редактора, науковий редактор:

*Ю.Ф. Павленко, д-р техн. наук, проф.,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*

Редакційна колегія:

О. Боднар, доц., університет Еребру, Швеція
*О.М. Величко, д-р техн. наук, проф.,
ДП "Укрметрестандарт", Україна*
*М.М. Горобець, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
ХНУ імені В.Н. Каразіна, Україна*
*О.В. Дзисюк, Метрологічний центр військових еталонів
Збройних Сил України, Україна*
І.П. Захаров, д-р техн. наук, проф., ХНУРЕ, Україна
*С.С. Зуб, д-р фіз.-мат. наук,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Україна
*О.Д. Купко, д-р техн. наук,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*
*Е. Манске, д-р техн. наук, проф., Технічний університет
Ільменау, Німеччина*
*Г. Мачін, д-р природничих наук, проф., Національна фізична
лабораторія, Велика Британія*
І.О. Мель, ННЦ "Інститут метрології", Україна
*Л.А. Назаренко, д-р техн. наук, проф.,
ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, Україна*
*Г.Ю. Народницький, д-р техн. наук,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*
В.В. Паракуда, канд. техн. наук, доц., ДП "НДІ Система", Україна
*О.В. Прокопов, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*
В.В. Семенець, д-р техн. наук, проф., ХНУРЕ, Україна
*В.В. Скляр, д-р техн. наук,
ННЦ "Інститут метрології", Україна*
*Б.І. Стадник, д-р техн. наук, проф.,
НУ "Львівська політехніка", Україна*
*Ю.М. Туз, д-р техн. наук, проф.,
НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Україна*

Відповідальний редактор С.В. Білоусова
Літературний редактор Н.О. Мірошніченко
Комп'ютерна верстка і дизайн Г.С. Мицик

Надруковано в ННЦ "Інститут метрології".
Адреса редакції: ННЦ "Інститут метрології",
вул. Мироносицька, 42, м. Харків, 61002
Тел.: (057) 704-98-43, факс: (057) 700-34-47
E-mail: journal@metrology.kharkov.ua
Вебсайт: <http://umj.metrology.kharkov.ua/>

Видання індексується міжнародною бібліометричною та наукометричною базою даних **Web of Science Core Collection, Google Scholar, WorldCat і BASE.**
ISSN (Print) 2306-7039
ISSN (Online) 2522-1345
DOI: 10.24027/2306-7039

Журнал зареєстрований у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію серія КВ № 22932-12832ПР від 26 вересня 2017 р.
"Український метрологічний журнал" включено до Переліку наукових фахових видань України на підставі Наказу МОН України від 15 жовтня 2019 р. № 1301 (категорія "А").
ННЦ "Інститут метрології" зареєстрований у Державному комітеті телебачення і радіомовлення України. Свідоцтво видавця серія ДК № 5944 від 15.01.2018 р.

Електронна версія – на сайті НБУ ім. В.І. Вернадського НАН України www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Umlzh/index.html

Журнал видається з 1995 р.

Editor-in-Chief:

*P. Neyezhnikov, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*

Deputy Editor-in-Chief, Scientific Editor:

*Yu. Pavlenko, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*

Editorial Board:

O. Bodnar, Örebro University, Örebro, Sweden
*O. Dzysyuk, Metrology Center of Military Standards of the Armed
Forces of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
*M. Gorobets, V.N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine*
*S. Kondrashov, National Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute", Kharkiv, Ukraine*
*O. Kupko, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*
G. Machin, National Physical Laboratory, Teddington, UK
E. Manske, Technical University of Ilmenau, Germany
*I. Mel, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*
*G. Narodnytskyi, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*
*L. Nazarenko, O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*
V. Parakuda, DP NDI "Systema", Lviv, Ukraine
*O. Prokopov, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*
*V. Semenets, Kharkiv National University of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine*
*V. Sklyarov, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*
B. Stadnyk, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
*Yu. Tuz, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*
O. Velychko, SE "Ukrmetreststandard", Kyiv, Ukraine
*I. Zakharov, Kharkiv National University of Radio Electronics,
Kharkiv, Ukraine*
*S. Zub, National Scientific Centre "Institute of Metrology",
Kharkiv, Ukraine*

Responsible Secretary S. Bilousova
Literary Editor N. Myroshnychenko
Desktop Publishing and Design H. Mytsik

Printed in NSC "Institute of Metrology"
Editorial Address: NSC "Institute of Metrology",
Myronosytska Str., 42, Kharkiv, 61002
Tel.: (057) 704-98-43, fax: (057) 700-34-47
E-mail: journal@metrology.kharkov.ua
Website: <http://umj.metrology.kharkov.ua/>

The edition is indexed by international bibliometric and scientometric database: **Web of Science Core Collection, Google Scholar, WorldCat and BASE.**
ISSN (Print) 2306-7039
ISSN (Online) 2522-1345
DOI: 10.24027/2306-7039

The Journal is registered in the Ministry of Justice of Ukraine. The Certificate of State Registration: series KV No. 22932-12832PR of September 26, 2017. "Ukrainian Metrological Journal" was included to the List of scientific specialized editions of Ukraine based on the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1301, dated October, 15, 2019 in category "A". NSC "Institute of Metrology" is registered in the State Committee for Television and Radio Broadcasting of Ukraine Certificate of publisher series DK No. 5944, dated January 15, 2018.

Electronic version is on the website of Vernadsky National Library of The NAS of Ukraine www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Umlzh/index.html

The Journal has been issued since 1995

Загальна та законодавча метрологія

Ф. Павезе. Невизначеність у разі відсутності інформації: екстраполяція даних у часі, з прикладами моделей прогнозування клімату 3

І.П. Захаров, О.А. Боцюра, П.І. Несєжмаков. Дослідження підходів до визначення необхідної кількості багаторазових спостережень..... 9

Вимірювання електричних та магнітних величин

О.М. Величко, Т.Б. Гордієнко. Метрологічні аспекти впровадження зарядних станцій для електромобілів 14

М.П. Сергієнко, І.О. Скрипка, Н.В. Штефан. Оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні тераомметрів та вимірювачів опору ізоляції..... 21

Вимірювання геометричних величин

Я.О. Серіков. Шляхи підвищення достовірності й точності визначення геометричних параметрів тріщин у бетоні будівельних об'єктів ультразвуковим імпульсним методом..... 26

Вимірювання оптико-фізичних та світлових величин

П.І. Несєжмаков, О.С. Пітяков, С.В. Шпак, С.А. Багіров, Т.В. Сахно, Г.М. Кожушко. Мигтіння яскравості світла світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення..... 33

М.Г. Кокодій, А.О. Натарова, І.А. Приз, О.В. Бєсова. Експрес-метод вимірювання показника заломлення прозорих волокон 43

С.А. Єфименко, І.В. Григоренко, Ю.Є. Хорошайло, С.М. Григоренко. Застосування коваріаційного аналізу для визначення факторного впливу на параметр контролю при колориметричному дослідженні..... 49

Вимірювання характеристик іонізуючого випромінювання

О.І. Юрченко, Т.В. Черножук, О.М. Бакланов. Аналіз гарячих теплоносіїв АЕС методом сонолюмінесцентної спектроскопії..... 56



General and legal metrology

F. Pavese. Uncertainty in case of lack of information: extrapolating data over time, with examples of climate forecast models 3

I. Zakharov, O. Botsiura, P. Neyezhnikov. Study of approaches to determining the required number of multiple observations..... 9



Measurements of electrical and magnetic quantities

O. Velychko, T. Gordiyenko. Metrological aspects of introducing charging stations for electric vehicles..... 14

M. Serhiienko, I. Skrypka, N. Shtefan. Evaluation of the measurement uncertainty during the calibration of teraohmmeters and insulation resistance meters 21



Measurements of geometric quantities

Ya. Serikov. Ways to increase the reliability and accuracy of determining the geometric parameters of cracks in the concrete of buildings using the ultrasonic pulse method 26



Measurements of optical-physical and luminous quantities

P. Neyezhnikov, O. Pitiakov, S. Shpak, S. Baghirov, T. Sakhno, G. Kozhushko. Luminance flicker of LED lamps and lighting fittings for general lighting..... 33

M. Kokodii, A. Natarova, I. Priz, O. Biesova. Express method for measuring the refractive index of transparent fibres 43

S. Yefymenko, I. Hryhorenko, Iu. Khoroshailo, S. Hryhorenko. Applying covariance analysis to determine the factor influence on the control parameter in colorimetric study 49



Measurements of ionizing radiation characteristics

O. Yurchenko, T. Chernozhuk, O. Baklanov. Analysis of hot coolants of nuclear power plants by sonoluminescence spectroscopy 56



Мигтіння яскравості світла світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення

П.І. Неєжмаков¹, О.С. Пітяков², С.В. Шпак³, С.А. Багіров⁴, Т.В. Сахно⁵, Г.М. Кожушко⁶

¹ Національний науковий центр “Інститут метрології”, вул. Мироносицька, 42, 61002, Харків, Україна
pavel.nevezhnikov@metrology.kharkov.ua

² Відокремлений структурний підрозділ “Полтавський політехнічний фаховий коледж Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, вул. Пушкіна, 83а, 36039, Полтава, Україна
oritiakov@polytechnic.poltava.ua

³ Державне підприємство “Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації”, вул. Вузька, 6, 36022, Полтава, Україна
ndcvel.to@gmail.com

⁴ Азербайджанський технічний університет, просп. Гусейна Джавіда, 25, 1073, Баку, Азербайджан
sabir.bagirov.61@mail.ru

⁵ Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, 36003, Полтава, Україна
sakhno2003@ukr.net

⁶ Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”, просп. Першотравневий, 24, 36011, Полтава, Україна
kozhuskogh@gmail.com

Анотація

Аналізуються результати досліджень впливу мигтіння яскравості джерел світла, що живляться від мережі змінного струму, на самопочуття та здоров'я людей, особливості мигтіння світлодіодних освітлювальних установок та рекомендації щодо безпечного рівня мигтіння яскравості ламп та світильників для загального освітлення. Розглядаються сучасні методи оцінювання параметрів мигтіння.

Вимірювання глибини модуляції яскравості та індексу мигтіння в частотному діапазоні до 3 кГц проводились відповідно до рекомендацій стандарту IEEE 1789:2015, короткострокової дози модуляції – відповідно до міжнародного стандарту IEC/TR 61547-1:2017, показника видимості стробоскопічного ефекту – відповідно до рекомендацій IEC/TR 63518:2018. Для вимірювання використано спектро радіометр МК350S із програмним забезпеченням для розрахунку фотометричних і колориметричних параметрів, параметрів мигтіння і стробоскопічного ефекту. Показано, що світлодіодна продукція для загального освітлення, яка поступає на світлотехнічний ринок України, має переважно безпечний рівень мигтіння яскравості. Рівень мигтіння яскравості сучасних світлодіодних ламп та світильників є нижчим, ніж у інших джерел світла, що живляться від змінного струму, в тому числі й розрядних ламп із високочастотними електронними пускорегулювальними апаратами. Зроблені висновки про необхідність внесення в нормативні документи на світлодіодну продукцію загального освітлення вимог до граничних рівнів мигтіння та методів вимірювання параметрів мигтіння.

Ключові слова: мигтіння; глибина модуляції яскравості; індекс мигтіння; короткострокова доза модуляції; стробоскопічний ефект; світлодіодні світильники (лампи).

Отримано: 08.08.2022

Відредаговано: 14.09.2022

Схвалено до друку: 21.09.2022

Постановка проблеми

Мигтіння яскравості світла завжди являло собою проблему, що властива електричним джерелам світла, які живляться змінним струмом. Швидко повторювана зміна яскравості світла в часі спричиняє такі відомі явища, як мигтіння яскравості та стробоскопічний ефект. Загальна назва цих явищ запропонована в [1] – часові світлові артефакти (temporal light artefacts, TLA). Терміном “мигтіння” (flicker) визначається

зміна яскравості (або колірності) світла, що безпосередньо сприймається спостерігачем. “Стробоскопічний ефект” (stroboscopic effect) – це ефект, який може стати видимим для спостерігача при освітленні рухомого об'єкта. Джерела світла, які створюють мигтіння або стробоскопічний ефект, не можуть забезпечувати якісне освітлення. Як мінімум мигтіння створює дискомфорт, але воно може стати і небезпекою для здоров'я – спричинити втому, напруженість очей, знижувати

продуктивність зорових робіт, провокувати головний біль, мігрені, створювати неврологічні проблеми, такі як епілептичні напади, посилювати аутичну поведінку в дітей та ін. [2–6].

Нової актуальності проблема мигтіння яскравості світла набула після широкого впровадження в технології освітлення світлодіодів, особливо при використанні широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) в системах управління освітленням. При ШІМ, як правило, використовуються частоти від 100 до 400 Гц, причому глибина модуляції досягає 100%. В порівнянні з лампами розжарювання (ЛР) та розрядними лампами (РЛ) мигтіння світла світлодіодних ламп та світильників можуть суттєво відрізнитись через надзвичайно швидку реакцію зміни світлового потоку на зміну струму. Це може призвести до побічних ефектів, які були менш помітними при освітленні лампами розжарювання та розрядними лампами.

У [5] відзначається, що зараз важливо зрозуміти, як модуляція яскравості світла світлодіодів впливає на здоров'я людини і як впливають технологічні фактори на модуляцію яскравості світла цих джерел.

Зважаючи на актуальність проблеми, Міжнародна комісія з освітлення (МКО) у 2011 р. створила технічний комітет ТКІ-83, який розробив дорожню карту досліджень, пов'язаних із модуляцією світла, що необхідні для розроблення міжнародних стандартів. Результати досліджень, наведені в роботі, стосуються саме цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У [1–6] аналізуються результати досліджень біологічних ефектів мигтіння в нових технологіях світлодіодного освітлення. В [1–3] узагальнено результати досліджень впливу мигтіння яскравості на біологічні процеси та умови їх виникнення. Зокрема, відзначається, що в діапазоні частот 3–70 Гц до ризиків належать судоми в осіб, які мають діагноз епілепсії, а також деякі специфічні неврологічні симптоми, в тому числі нездужання та головний біль. Менш очевидні біологічні

ефекти виникають при дії невидимого мигтіння. Це перенапруження очей, втома, головний біль.

Точкові джерела світла мають меншу ймовірність виклику судом та головного болю, ніж розсіяне світло, яке охоплює більшу частину сітківки ока. Найбільша ймовірність виникнення епілептичних судом має місце на частотах 15–20 Гц. Мигтіння червоного світла з великою глибиною модуляції та чергування червоних і синіх спалахів можуть бути особливо небезпечними.

У [6] сформульовані критерії, які можуть пом'якшити біологічні ефекти мигтіння світла при використанні світлодіодних ламп та світильників. Мигтіння яскравості залежить від параметрів драйверів (ПРА), що застосовуються в лампах та світильниках, системах управління освітленням (димера) та інших зовнішніх впливів (якості напруги в електромережі, електричних завод, що створюються різними споживачами електроенергії та ін.). Проблеми з мигтінням доцільно вирішувати в кожному випадку індивідуально. Мигтіння має найбільше значення в загальному освітленні житлово-побутових приміщень, дитячих, шкільних та медичних закладів, промислових приміщеннях із рухомою технікою та робочих місць із напруженою зоровою роботою тощо. Вимоги щодо низького ризику мигтіння світла та методи їх оцінювання також рекомендовані в документах [7–11].

Американський інститут інженерів з електротехніки та електроніки в [6] узагальнив дані багатьох незалежних досліджень і сформулював такі критерії:

$$1) \text{ глибина модуляції MD (\%)} = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \times 100,$$

де L_{\max} , L_{\min} – відповідно максимальна та мінімальна яскравість (рис. 1), що відповідає низькому рівню ризику на частотах, нижчих ніж 90 Гц, має не перевищувати числові значення (у відсотках), що визначаються з виразу

$$\text{MD \%} < 0,025f, \quad (1)$$

де f – частота модуляції;

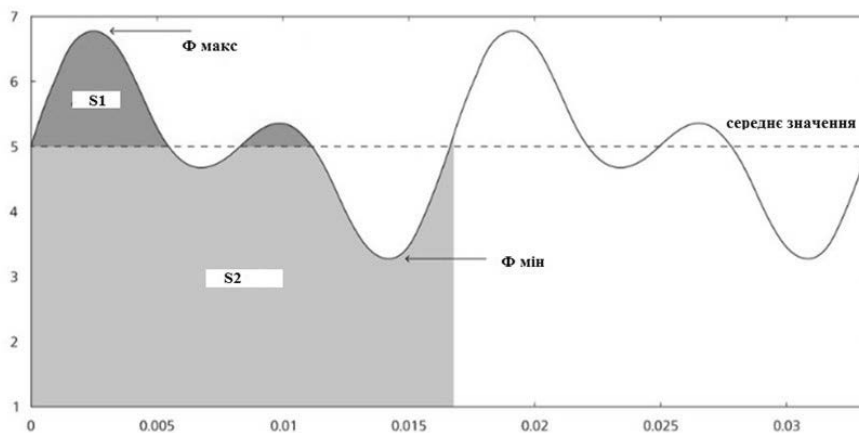


Рис. 1. До визначення глибини модуляції яскравості та індексу мигтіння FI

2) при $f > 90$ Гц допустима глибина модуляції визначається із виразу

$$MD \% \leq 0,08f. \quad (2)$$

Рівень модуляції, при якому відсутні біологічні впливи на організм людини, має бути в 2,5 рази менший, ніж визначений виразами (1) та (2).

Для врахування коливань форми хвилі використовується індекс мигтіння (FI). Він встановлює зміну яскравості протягом періоду по відношенню до її середнього значення. FI визначається як відношення площі S_1 до суми S_1+S_2 (рис. 1). Для низького ризику FI не повинен перевищувати значення 0,1.

На основі критеріїв, вказаних у [6], рекомендовані такі практики:

1. Для обмеження можливих несприятливих біологічних ефектів глибина модуляції не повинна перевищувати $0,025f$ для частот, нижчих за 90 Гц.

В інтервалі частот 90–1250 Гц глибина модуляції має бути чисельно меншою за 0,08f; вище 1250 Гц по глибині модуляції обмежень немає.

2. Якщо потрібно забезпечити рівень NOEL (No observable effect level – відсутній будь-який біологічний вплив на організм людини), то слід зменшити модуляції в 2,5 рази у порівнянні з рекомендованою практикою 1, тобто: нижче 90 Гц – глибина модуляції має бути меншою за $0,01f$ %; у межах від 90 до 3000 Гц – глибина модуляції має бути меншою за $0,0333f$ %; вище 3000 Гц обмеження на модуляції відсутні.

3. Запобігання виникненню фоточутливих епілептичних нападів. Глибина модуляції яскравості для частот, нижчих за 90 Гц, має бути меншою за 5%.

Головним недоліком методики оцінювання мигтіння, наведеної в [6], є те, що вона не вра-

ховує сприйняття людиною мигтіння залежно від частоти. В [11] рекомендується об'єктивний метод для оцінювання мигтіння з урахуванням його сприйняття спостерігачем на різних частотах у діапазоні від 3 до 60 Гц.

На рис. 2 наведено порогові значення глибини модуляції залежно від частоти виявлення з вірогідністю 50%. Як видно з рис. 2, при частоті 15 Гц спостерігач може виявити мигтіння при відносній глибині модуляції 0,5%, тоді як при частоті 60 Гц для виявлення мигтіння потрібна глибина модуляції майже 60%. Результуючі значення модуляції для кожної частоти виражаються через порогові виявлення і позначаються як M_{pk} . Модуляція, що сприймається і відповідає пороговому значенню (виявляється з вірогідністю 50%), приймається за одиницю. При значеннях, менших за одиницю, виявити мигтіння неможливо, а при значно більших – виявляється легко. Якщо мигтіння в інтервалі 3–60 Гц має різні частоти, то результуюче сприймання модуляції M_p визначають як:

$$M_p = \sqrt{\sum_k (M_{pk})^2}, \quad (3)$$

де $k=1, 2, 3 \dots$

Результуюче значення M_p інтерпретується так само, як і M_{pk} для окремих частот: при $M_p = 1$ – порогові значення, що виявляються з вірогідністю 50%; при $M_p < 1$ – мигтіння невидимі; при $M_p > 1$ – мигтіння виявляється легко.

У [9] описано об'єктивний метод оцінювання мигтіння світла, що ґрунтується на стандартах, у яких встановлені методи вимірювання та вимоги до приладів для точного сприйняття коливання напруги. Мигтіння оцінюється короткостроковою дозою мигтіння (short-term flicker indicator, P_{st}^{LM}) за допомогою флікметра. Інтерпретація результатів випробування така: при $P_{st}^{LM} = 1$ досліджуване

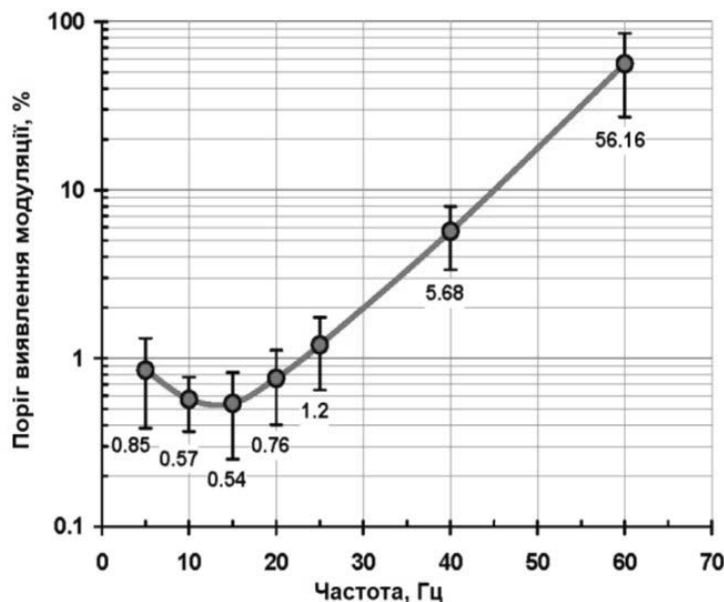


Рис. 2. Порогові значення глибини модуляції яскравості при різних частотах [11]

джерело світла має рівень мигтіння, який виявляє спостерігач із вірогідністю 50%, такий, як і в лампах розжарювання потужністю 60 Вт; при $P_{st}^{LM} < 1$ – джерело світла має рівень мигтіння нижчий, ніж у ламп розжарювання потужністю 60 Вт; при $P_{st}^{LM} > 1$ – рівень мигтіння вищий, ніж у ламп розжарювання, і його легко виявити.

Що стосується оцінювання стробоскопічного ефекту, то об'єктивний метод вимірювання видимості стробоскопічного ефекту (stroboscopic effect visibility, SVM) запропоновано у стандарті [10]. Розглянуті в цьому документі умови виникнення стробоскопічного ефекту обмежуються оцінкою при освітленостях, більших за 100 лк, та при помірних швидкостях об'єкта (< 4 м/с). SVM не оцінює впливи мигтіння на здоров'я і не є мірою для оцінки небажаних стробоскопічних ефектів у промисловості. Метод розрахований для оцінки ТЛА в офісах, житлових приміщеннях та аналогічних умовах.

Числові значення SVM можуть коливатися в межах від 0 до 9. При SVM=0 будь-яка модуляція світла відсутня, тоді як при SVM \approx 9 модуляція прямокутної форми (з нескінченно малою тривалістю імпульсу) дорівнює 100%.

SVM – об'єктивний показник, що отриманий на основі лабораторних досліджень та досліджень із виявлення порогів сприйняття стробоскопічного ефекту людьми.

Результати вимірювання SVM можна інтерпретувати таким чином [10]:

- при SVM = 1 – стробоскопічний ефект, що створює модуляція світла, є на порозі видимості. Це означає, що середній спостерігач може виявити стробоскопічний ефект з імовірністю 50%;
- якщо значення SVM < 1 , то ймовірність виявлення менша за 50%, а якщо SVM > 1 – то відповідність буде вищою за 50%.

Слід також зазначити, що рівень сприймання ТЛА може бути набагато вищим за межу видимості. Сприймання залежить від тривалості впливу, швидкості руху об'єкта та інших факторів [10].

Із порівняння вимог різних нормативних документів до низького рівня ризику, що створює мигтіння, або рівня ризику NOEL видно, що найбільш жорсткими вони є в стандарті [6]. Навіть лампи розжарювання, в яких глибина модуляції на частоті 100 Гц становить 12–15%, не відповідають вимогам рекомендованої практики 1 цього стандарту. Тому в ряді публікацій, наприклад, у [12], пропонується замість показників MD та FI, запропонованих у [6], використовувати для оцінювання рівня мигтіння P_{st}^{LM} [11], а для стробоскопічного ефекту – SVM [10]. Ці вимоги менш жорсткі, враховують частоту, форму хвилі, які фактично можуть передбачити для людини видимість мигтіння та стробоскопічного ефекту.

Виробники світлотехнічної продукції для оцінювання ступеня мигтіння та стробоскопічного ефекту використовують як показники MD та FI [6], так і P_{st}^{LM} [9] та SVM [10]. В Україні для визначення рівня якості світла стосовно мигтіння використовується лише один показник – коефіцієнт пульсації [12], а параметри мигтіння, що спричиняють стробоскопічний ефект, взагалі не нормуються.

Метою роботи є аналіз особливостей ТЛА світлодіодів, методів їх вимірювання й дослідження параметрів мигтіння та стробоскопічного ефекту світлодіодних ламп і світильників, що поступають на ринок України, з використанням методик, наведених у стандартах [6, 9, 10].

Результати дослідження

Досліджували комерційні зразки світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення, що поступають на світлотехнічний ринок України від різних виробників. Призначення досліджуваної продукції стосувалося, в основному, освітлення офісних та житлових приміщень, а також навчальних і медичних закладів. Вимірювали глибину модуляції яскравості та індекс мигтіння відповідно до рекомендацій [6], короткострокову дозу модуляції відповідно до [9] та показник видимості стробоскопічного ефекту відповідно до [10].

У більшості сучасних ламп і світильників для загального освітлення використовуються світлодіоди, кристали яких випромінюють синє світло, яке частково за допомогою люмінофора перетворюється на жовто-зелене. Різне співвідношення синього і жовто-зеленого світла, що виходить за межі світлодіода, утворює біле світло різної колірності.

Мигтіння яскравості світлодіодів відрізняється від інших джерел світла через надзвичайно швидко реакцію світлового потоку на зміну струму. Для кристалу світлодіода стала часу зміни світлового потоку синього світла після зміни струму становить усього кілька наносекунд, у той час як для люмінофора стала часу післясвітіння (після поглинання квантів синього світла) становить більше 200 мікросекунд. Це може створювати різну глибину модуляції яскравості синього та жовто-зеленого світла. Результуюча глибина модуляції яскравості визначається співвідношенням синьої та жовто-зеленої складових у сумарному світловому потоці.

Для експериментального підтвердження цієї гіпотези нами за допомогою фільтрів із оптичного скла марки СС-11 і марки ЖЗС-17 виділялися синя та жовто-зелена ділянки спектра випромінювання світлодіодів і вимірювалися глибина модуляції MD та індекс модуляції FI яскравості світла виділених ділянок за допомогою спектрорадіо-

Параметри мигтіння випромінювання кристалу та люмінофору світлодіодів

Діапазон довжин хвиль, нм	Глибина модуляції (MD), %	Індекс мигтіння FI, відн. од.
400–460	18,33	0,01957
480–760	1,63	0,00269
400–760	2,16	0,00241

метра МК350S [13]. З використанням цього приладу вимірювали й результуючі значення MD і FI при змішуванні синьої та жовто-зеленої складових світлового потоку світильників. Результати вимірювання для світильника зі світлодіодами з корельовано колірною температурою 4900K наведено в табл. 1.

Результуюча глибина модуляції визначається, в основному, глибиною модуляції жовто-зеленої складової світлового потоку, яка кількісно значно переважає синю складову через більш високу чутливість ока до жовто-зеленого діапазону спектра.

Відомо, що світлодіоди мають кутову нерівномірність спектрального складу випромінювання. Синє світло, що випромінюється кристалом під малими кутами до оптичної осі світлодіода, розповсюджується в люмінофорі, який нанесений на кристал (або на оболонку, що оточує кристал) по коротшому шляху і менше поглинається. Тому при малих кутах спостереження частка синього світла, що виходить за межі світлодіода, буде більшою, а при великих кутах – меншою.

При використанні в світлодіодних світильниках і лампах розсіювачів із дифузним пропусканням світла можна отримати рівномірний кутовий розподіл спектрального випромінювання, відповідно і рівномірний кутовий розподіл параметрів мигтіння яскравості. Але при певних розмірах глушних частинок (0,17–0,33 мкм) в матовому склі відбувається виражене розсіювання і поглинання короткохвильового світла. Зі зміною співвідношення синього і жовто-зеленого світла, залежно від кута спостереження, змінюється і сумарна величина параметрів мигтіння.

Кутова нерівномірність MD для світлодіодних ламп та світильників із високим ССТ в окремих випадках може досягнути 6% [14], тому результати вимірювання MD залежать від кута падіння світла на фотоприймач. Слід також зауважити, що на результат вимірювання MD може впливати і відстань вимірювання, оскільки зі зміною відстані змінюється кут поля зору, що охоплює при вимірюванні площу випромінюючої поверхні.

Стандартом [15] при вимірюванні фотометричних та колориметричних параметрів світлодіодних джерел світла, зважаючи на їх кутову нерівномірність, рекомендовано використовувати

такі геометрії: 1) в певному напрямку; 2) розподілом по заданих напрямках; 3) визначення просторово-усереднених значень.

Слід зазначити, що просторово-усереднені значення параметрів мають декларуватись для всіх світлодіодних ламп та світильників, якщо не встановлено інше.

Для виконання вимог [15] пропонується усереднювати параметри світла при вимірюванні шляхом використання кульового фотометра. Досліджуваний світильник (лампа) розміщується в кульовому фотометрі, внутрішня поверхня якого покрита дифузно-відбиваючою фарбою з не-селективним коефіцієнтом відбиття, приблизно рівним 0,8–0,95. Світловий потік за рахунок багаторазових відбиттів рівномірно розподіляється по внутрішній поверхні фотометра, створюючи однакову освітленість і однорідність спектрального складу. Для забезпечення точності вимірювання сигнал, що створюється мигтінням світла, повинен бути таким, щоб забезпечувалось необхідне співвідношення “сигнал-шум”. Мінімальну освітленість E_0 , при якій шуми не впливають на результати вимірювання, можна визначити для конкретного приладу із залежності глибини модуляції від рівня освітленості. Забезпечити таку освітленість (для різних світлових потоків джерел світла) можна шляхом вибору розмірів фотометричної кулі. Співвідношення між освітленістю внутрішньої поверхні кулі, світловим потоком, діаметром та коефіцієнтом дифузного відбиття поверхні виражається відомою формулою:

$$E_0 \leq \frac{\Phi \cdot \rho}{\pi d^2 (1 - \rho)}, \quad (4)$$

де E_0 – освітленість, лк; Φ – світловий потік, лм; d – діаметр кулі, м; ρ – коефіцієнт відбиття.

Результати вимірювання усереднених параметрів мигтіння з використанням фотометричної кулі забезпечують хорошу відповідність до результатів вимірювання за допомогою гоніофотометра. (Наприклад, усереднені значення MD, визначені з використанням фотометричної кулі, становлять 2,164%. Розрахункове середнє значення за результатами вимірювання з використанням гоніофотометра через інтервал 10° становить 2,156%).

Результати вимірювання середніх значень P_{st}^{LM} , MD, FI та SVM світлодіодних світильників і ламп

Таблиця 2

Результати вимірювання параметрів мигтіння яскравості світла та показника видимості стробоскопічного ефекту SVM світлодіодних ламп та світильників

Назва виробу	№ зразка	Частота мигтіння, Гц	Глибина модуляції, %	Індекс мигтіння, відн. од.	P_{st}^{LM} , відн. од.	SVM, відн. од.
Світлодіодні світильники для внутрішнього освітлення	1	100	1,95	0,0021	0,0443	0,0096
	2	1020	0,98	0,0044	0,032	0,0013
	3	100	2,05	0,0020	0,0785	0,0103
	4	100	1,10	0,0022	0,0621	0,0107
	5	100	4,07	0,0205	0,0941	0,2152
	6	100	1,03	0,0014	0,0632	0,0052
	7	100	2,36	0,0032	0,0450	0,0254
	8	100	1,82	0,0033	0,0325	0,0099
	9	400	22,30	0,0326	0,0644	0,0397
	10	100	5,91	0,0081	0,0910	0,0884
	11	100	1,64	0,0031	0,0280	0,0111
	12	100	2,60	0,0058	0,0780	0,0697
Світлодіодні лампи	1	100	12,9	0,0355	0,3627	0,0219
	2	100	10,8	0,0350	0,2726	0,0212
	3	100	2,0	0,0220	0,0532	0,0107
	4	100	3,3	0,0025	0,0568	0,0121
	5	100	3,31	0,0053	0,0540	0,0115
	6	2208	14,95	0,0353	0,0405	0,0415
	7	1766	14,28	0,0355	0,0430	0,0553
	8	100	3,41	0,0049	0,0791	0,0345
	9	100	1,11	0,0263	0,0316	0,0502
	10	100	2,0	0,0022	0,0459	0,0092
	11	2204	15,73	0,0354	0,0430	0,0434
	12	50	4,01	0,0043	0,9228	0,0214

Таблиця 3

Результати вимірювання параметрів мигтіння яскравості світла та показника видимості стробоскопічного ефекту SVM компактних люмінесцентних ламп

Назва виробу	№ зразка	Частота мигтіння, Гц	Глибина модуляції, %	Індекс мигтіння, відн. од.	P_{st}^{LM} , відн. од.	SVM, відн. од.
Компактні люмінесцентні лампи	1	100	15,89	0,0200	0,1950	0,1834
	2	100	11,91	0,0209	0,4265	0,2383
	3	100	15,36	0,0221	0,4118	0,2370
	4	100	7,92	0,0164	0,2619	0,1912
	5	100	8,10	0,0193	0,2605	0,2005
	6	100	10,70	0,0205	0,3441	0,2152

наведені в табл. 2. Для порівняння зі світлодіодними лампами та світильниками були проведені вимірювання компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ), результати наведені в табл. 3. Похибки вимірювання оцінювались відповідно до стандарту [16] і не перевищують 8%.

Як видно з отриманих результатів, більшість досліджених ламп та світильників створюють миг-

тіння яскравості на частоті 100 Гц. Модуляцію яскравості світла, меншу за граничний рівень (що відповідає низькому ризику згідно з вимогами [6]), мають понад 70% досліджених світлодіодних ламп, із них більшість відповідають рівню NOEL. Для світлодіодних світильників цей показник ще вищий. Порівнюючи параметри мигтіння яскравості світлодіодних ламп та світильників із мигтінням,

що створюють компактні люмінесцентні лампи, видно, що вони за цими параметрами мають переваги. Більшість сучасних світлодіодних ламп та світильників мають низький рівень модуляції яскравості світла, який відповідає найжорсткішим вимогам стандарту [6].

Мигтіння яскравості світлодіодних ламп та світильників, що живляться від мережі змінного струму, не є проблемою самих світлодіодів, а пов'язане з пристроями живлення (драйверами). Драйвери серед інших функцій перетворюють змінний струм у постійний. Це перетворення ніколи не буває ідеальним, завжди створює певну пульсацію у вихідному струмі, що в свою чергу створює модуляцію яскравості світла. Виробники інколи, з метою зниження вартості світлодіодних ламп та світильників, використовують дешеві неякісні драйвери, тому високий рівень мигтіння є перш за все проблемою дешевої світлодіодної продукції. Недоліком світлодіодних ламп та світильників є також те, що глибина модуляції в них, залежно від параметрів драйвера, може бути від 0 до 100%, в той час як у КЛЛ з високочастотними електронними апаратами – не більше 15%. Проблема тут у тому, щоб світлодіодна продукція з високим рівнем мигтіння яскравості не потрапляла до споживачів. Параметри мигтіння мають регламентуватись у документах на світлодіодну продукцію і декларуватись виробниками. В перспективі заміна розрядних ламп на світлодіодні лампи і світильники з низьким рівнем мигтіння яскравості дозволить повністю вирішити проблему мигтіння світла та виникнення стробоскопічного ефекту в загальному освітленні.

Висновки

1. Фактори, що впливають на біологічні та психологічні ефекти дії мигтіння яскравості світла на самопочуття та здоров'я людей, залежать від частоти, глибини модуляції яскравості, а також від форми хвилі зміни струму, яскравості та спектра світла, кута поля зору та ін. Згідно з сучасними даними, негативна дія мигтіння яскравості має місце в частотному діапазоні до 3000 Гц. Найбільш небезпечним є мигтіння, що спричиняється в діапазоні частот 3–70 Гц.

2. На сьогодні не існує єдиних рекомендацій МКО стосовно безпечних рівнів мигтіння яскравості в діапазоні 3–3000 Гц. До розроблення рекомендацій МКО доцільно тимчасово використовувати рекомендації американського стандарту IEEE 1789:2015, в якому сформульовані основні критерії, що можуть пом'якшити біологічні ефекти мигтіння яскравості світла при використанні світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення. Рівень мигтіння яскравості в діапазоні частот 3–70 Гц доцільно додатково оцінювати за короткостроковою дозою модуляції P_{st}^{LM} відповідно до міжнародного стандарту IEC 61547-1.

3. Об'єктивний метод оцінювання видимості стробоскопічного ефекту в офісних, житлових та аналогічних приміщеннях при освітленості більше 100 лк і швидкості руху об'єктів 4 м/с рекомендований у міжнародних стандартах IEC 62158 і IEC 62518.

4. Глибина модуляції яскравості синього світла, що випромінюється кристалом світлодіода, значно більша від глибини модуляції зеленого світла, що випромінюється люмінофором після поглинання синього світла. Результируюча глибина модуляції яскравості, що випромінює світлодіод, визначається співвідношенням жовто-зеленої та синьої складових світлового потоку. Оскільки чутливість ока в жовто-зеленій області значно вища від чутливості в синій області, то результируюча глибина модуляції визначається, в основному, модуляцією світла, що випромінює люмінофор.

5. Світлодіодні джерела світла через кутову нерівномірність спектрального складу випромінювання мають кутову нерівномірність параметрів мигтіння яскравості. Для визначення усереднених значень параметрів мигтіння доцільно використовувати інтегруючу фотометричну кулю.

6. Рівень мигтіння сучасних світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення нижчий, ніж у будь-яких джерел світла, що живляться від мережі змінного струму, в тому числі розрядних ламп із високочастотними електронними пускорегулювальними апаратами. Мигтіння яскравості світлодіодних джерел світла є проблемою не самих світлодіодів, а пов'язане з пристроями їх живлення (драйверами).

Мерцание яркости света светодиодных ламп и светильников для общего освещения

П.И. Неежмаков¹, А.С. Питяков², С.В. Шпак³, С.А. Багиров⁴, Т.В. Сахно⁵, Г.М. Кожушко⁶

¹ Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Миросолицкая, 42, 61002, Харьков, Украина
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua

² Структурное подразделение "Полтавский политехнический профессиональный колледж Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", ул. Пушкина, 83а, 36039, Полтава, Украина
opitiakov@polytechnic.poltava.ua

³ Государственное предприятие "Полтавский региональный научно-технический центр стандартизации, метрологии и сертификации", ул. Узкая, 6, 36022, Полтава, Украина
ndcvel.to@gmail.com

⁴ Азербайджанский технический университет, просп. Гусейна Джавида, 25, 1073, Баку, Азербайджан
sabir.bagirov.61@mail.ru

⁵ Полтавский государственный аграрный университет, ул. Сквороды, 1/3, 36003, Полтава, Украина
sakhno2003@ukr.net

⁶ Национальный университет "Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка", просп. Первомайский, 24, 36011, Полтава, Украина
kozhuskogm@gmail.com

Аннотация

Анализируются результаты исследований влияния мерцания яркости источников света, питающихся от сети переменного тока, на самочувствие и здоровье людей, особенности мерцания светодиодных осветительных установок и рекомендации по безопасному уровню мерцания яркости ламп и светильников для общего освещения. В работе рассматриваются также современные способы оценки характеристик мерцания, рекомендуемые международными стандартами.

Показано, что светодиодная продукция для общего освещения, поступающая на светотехнический рынок Украины, имеет преимущественно безопасный уровень мерцания яркости. Уровень мерцания яркости современных светодиодных ламп и светильников ниже, чем у других источников света, питающихся от переменного тока, в том числе и разрядных ламп с высокочастотными электронными пускорегулирующими аппаратами. Сделаны выводы о необходимости внесения в нормативные документы на светодиодную продукцию общего освещения требований к граничным уровням мерцания и методам измерения параметров мерцания.

Ключевые слова: мерцание; глубина модуляции яркости; индекс мерцания; краткосрочная доза модуляции; стробоскопический эффект; светодиодные светильники (лампы).

Luminance flicker of LED lamps and lighting fittings for general lighting

P. Neyezhnikov¹, O. Pitiakov², S. Shpak³, S. Baghirov⁴, T. Sakhno⁵, G. Kozhushko⁶

¹ National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua

² Poltava Polytechnic Professional College, a Separated Structural Unit of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Pushkinska Str., 83a, 36039, Poltava, Ukraine
opitiakov@polytechnic.poltava.ua

³ State Enterprise "Poltava Regional Research and Technical Center of Standardization, Metrology and Certification", Uzkaia Str., 6, 36022, Poltava, Ukraine
ndcvel.to@gmail.com

⁴ Azerbaijan Technical University, Huseyn Javid Ave., 25, 1073, Baku, Azerbaijan
sabir.bagirov.61@mail.ru

⁵ Poltava State Agrarian University, Skovorody Str., 1/3, 36003, Poltava, Ukraine
sakhno2003@ukr.net

⁶ National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Pershotravneva Ave., 24, 36011, Poltava, Ukraine
kozhuskogm@gmail.com

Abstract

The results of the studies of the impact of luminance flicker of light sources powered by an alternating current network on the well-being and health of people, the peculiarities of the flicker of LED lighting installations and recommendations on the safe level of luminance flicker of lamps and lighting fittings for general lighting are analysed. The paper also considers modern methods of evaluating flicker parameters, which are recommended by international standards.

The luminance flicker of commercial samples of LED lamps and lamps that are being introduced to the lighting market from various manufacturers of LED products was studied.

Measurements of the depth of luminance modulation and flicker index in the frequency range up to 3 kHz in accordance with the recommendations of the IEEE 1789:2015 standard were carried out. Measurements of the short-term modulation dose in accordance with the IES/TR 61547-1:2017 international standard were carried out. Measurements of the visibility indicator of the stroboscopic effect in accordance with the recommendations of the IES/TR 63518:2018 standard were carried out. The MK350S spectroradiometer with software for calculating photometric and colorimetric parameters, as well as the flicker and stroboscopic effect parameters, was used. It was found out that LED products for general lighting that are being introduced to the Ukrainian lighting market mainly have a safe level of luminance flicker. The level of luminance flicker of modern LED lamps and lighting fittings is lower than that of any other light sources powered by an alternating current network, including discharge lamps with high-frequency electronic ballasts. It was concluded that the requirements for the limit levels of flicker for various frequency ranges and methods of measuring flicker parameters should be included in the regulatory documents on LED products for general lighting.

Keywords: flicker; depth of luminance modulation; flicker index; short-term modulation dose; stroboscopic effect; LED lamps.

Список літератури

1. CIE TN 006:2016. Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models. CIE, 2016. 23 p.
2. Lehman B., Wilkins A.J. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2014, vol. 1, issue 3, pp. 18–26. doi: 10.1109/MPREL.2014.2330442
3. Wilkins A., Veitch J., Lehman B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. *Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 171–178. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618050
4. Fisher R.S., Harding G., Erba G., Barkley G.L., Wilkins A. Photic- and Pattern-induced seizures: A Review for the Epilepsy Foundation of America Working Group. *Epilepsia*, 2005; vol. 46, issue 9, pp. 1426–1241. doi: 10.1111/j.1528-1167.2005.31405.x
5. CIE TN 008:2017. Final Report CIE Stakeholder Workshop for Temporal Light Modulation Standards for Lighting Systems. CIE, 2017. 25 p.
6. IEEE 1789-2015. Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. IEEE, 2015. 80 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7118618
7. Method of Measurement for Light Source Flicker. ENERGY STAR, 2016. 7 p.
8. NEMA 77-2017. Temporal Light Artifacts: Test Methods and Guidance for Acceptance Criteria. NEMA, 2017. 50 p.
9. IEC TR 61547-1:2017. Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method. IEC, 2017. 39 p.
10. IEC TR 63158:2018. Equipment for general lighting purposes – Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment. IEC, 2018. 35 p.
11. Recommended metric for assessing the direct perception of light source flicker. *ASSIST recommends*, 2015, vol. 11, issue 3. 18 p.
12. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ, 2018. 137 с.
13. MK350S Premium User Manual. Product Description, Accessories, Operations, Settings. URL: <https://www.uprtek.com/ru/download-center-a#mk350s> (дата звернення 05.08.2022 р.).
14. Шпак С., Кислиця С., Кожушко Г., Сахно Т., Багіров С. Мерехтіння освітленості та стробоскопічний ефект, що утворюють світлодіодні лампи та світильники. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 2 (60). С. 135–143. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.135>
15. EN 13032-4:2015+A1:2019. Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED lamps, modules and luminaires. EN, 2019. 71 p.
16. ДСТУ 9120:2021. Метрологія. Люксометри, яскравоміри та пульсометри. Методика повірки. Київ, 2021. 24 с.

References

1. CIE TN 006:2016. Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models. CIE, 2016. 23 p.

2. Lehman B., Wilkins A.J. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2014, vol. 1, issue 3, pp. 18–26. doi: 10.1109/MPEL.2014.2330442
3. Wilkins A., Veitch J., Lehman B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. *Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 171–178. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618050
4. Fisher R.S., Harding G., Erba G., Barkley G.L., Wilkins A. Photic- and Pattern-induced seizures: A Review for the Epilepsy Foundation of America Working Group. *Epilepsia*, 2005; vol. 46, issue 9, pp. 1426–1241. doi: 10.1111/j.1528-1167.2005.31405.x
5. CIE TN 008:2017. Final Report CIE Stakeholder Workshop for Temporal Light Modulation Standards for Lighting Systems. CIE, 2017. 25 p.
6. IEEE 1789-2015. Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. IEEE, 2015. 80 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7118618
7. Method of Measurement for Light Source Flicker. ENERGY STAR, 2016. 7 p.
8. NEMA 77-2017. Temporal Light Artifacts: Test Methods and Guidance for Acceptance Criteria. NEMA, 2017. 50 p.
9. IEC TR 61547-1:2017. Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method. IEC, 2017. 39 p.
10. IEC TR 63158:2018. Equipment for general lighting purposes – Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment. IEC, 2018. 35 p.
11. Recommended metric for assessing the direct perception of light source flicker. *ASSIST recommends*, 2015, vol. 11, issue 3. 18 p.
12. DBN V.2.5-28:2018. Natural and artificial lighting. Kyiv, 2018. 137 p. (in Ukrainian).
13. MK350S Premium User Manual. Product Description, Accessories, Operations, Settings. Available at: <https://www.uprtek.com/ru/download-center-a#mk350s> (accessed 05.08.2022).
14. Shpak S., Kyslytsia S., Kozhushko G., Sakhno T., Bagirov S. Merekhennia osvitenosti ta stroboskopichniy efekt, shcho utvoriuiut svitlodiodni lampy ta svitylnyky [Flickering light and stroboscopic effect from LED lamps and light fixtures]. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*. Poltava, 2020, vol. 2(60), pp. 135–143 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.135>
15. EN 13032-4:2015+A1:2019. Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED lamps, modules and luminaires. EN, 2019. 71 p.
16. DSTU 9120:2021. Metrology. Luxmeters, luminance, flickermeters. Verification procedure. Kyiv, 2021. 24 p. (in Ukrainian).