

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА СВІЛОТЕХНІКИ І ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ
СВІТЛА ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЗОРОВИЙ КОМФОРТ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Дмитро ПЕРЕПЕЛИЦЯ

гр. СДС 2023-1у

Керівник:

Анастасія КОЛЕСНИК

к.т.н., доц.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра світлотехніки і джерел світла

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Світлотехніка та дизайн світлового середовища



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СДС

Віталій ГЕРАСИМЕНКО

«13» червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
до бакалаврської кваліфікаційної роботи
Перепелиці Дмитру Володимировичу

1. Тема роботи: Дослідження характеристик світлодіодних джерел світла та їх вплив на зоровий комфорт,

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Колесник А. І., к.т.н., доцент кафедри СДС,

затверджені наказом університету 440-03 від « 22 » травня 2026 р.

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:
10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Аналітична частина. Проведено аналіз сучасних світлодіодних джерел світла побутового та комерційного призначення. Розглянуто основні світлотехнічні та енергетичні характеристики LED-ламп, нормативні вимоги до показників якості освітлення та їх вплив на зоровий комфорт людини.

4.2 Світлотехнічна частина. Виконано дослідження 17 зразків світлодіодних ламп із визначенням їх енергетичних, фотометричних та колориметричних характеристик. Проведені фотометричні та електричні вимірювання з використанням сучасного спеціалізованого обладнання.

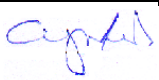
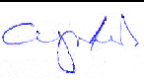
4.3 Аналіз результатів і рекомендації щодо застосування. За результатами досліджень встановлено значні розбіжності між фактичними та заявленими виробниками характеристиками LED-ламп. Виявлено зразки з підвищеним рівнем стробоскопічного ефекту, недопустимими показниками флікеру та низькою якістю передачі кольору. Розроблено рекомендації щодо вибору безпечних світлодіодних джерел світла.

4.4 Охорона праці. Вимірювання світлотехнічних характеристик побутових ламп. Особливості виконання такого роду робіт. Спеціальне устаткування для виконання робіт.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових слайдів):

1. Актуальність, Мета, Завдання. 2. Аналітична частина. 3. Світлотехнічний розділ. 4. Аналіз результатів і рекомендації щодо застосування. 5. Охорона праці. 6. Висновки.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Анастасія КОЛЕСНИК, доцент		
Охорона праці	Яків СЕРІКОВ, доцент		
Антиплагіат	Олена ДІДЕНКО, ст. викладач		
Нормоконтроль	Роман ВОРОНОВ, доцент		

7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	07.05.26 – 11.05.26	виконано
2	Світлотехнічна частина	12.05.26 – 21.05.26	виконано
3	Аналіз результатів і рекомендації щодо застосування	22.05.26 – 25.06.26	виконано
4	Охорона праці	26.05.26 – 30.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	31.06.26 – 03.06.26	виконано
6	Підготовка доповіді та презентації	04.06.26 – 10.06.26	виконано

Здобувач



Дмитро ПЕРЕПЕЛИЦЯ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



Анастасія КОЛЕСНИК

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена питанню комплексного дослідження світлотехнічних та колориметричних характеристик світлодіодних ламп, оцінки рівня їхніх пульсацій та аналізу впливу цих параметрів на людину за допомогою сучасних метрик якості світла.

У першому розділі виконано аналітичний огляд літератури щодо впливу характеристик світлодіодних джерел світла на зоровий комфорт, розглянуто пульсації світлового потоку, спектральний розподіл випромінювання та сучасні метрики якості світла.

Другий розділ описує світлотехнічну частину, включаючи методику вимірювання пульсацій і колірних параметрів, а також опис застосованого спектрометра типу МК350S та проведення дослідів.

Третій розділ присвячений аналізу результатів і рекомендаціям щодо застосування, де розглядаються досліджені лампи, результати вимірювання їхніх пульсацій, спектральні та колірні характеристики, а також оцінюється їх відповідність чинним стандартам та безпосередній вплив на людину.

У четвертому розділі наведено інформацію щодо охорони праці, проаналізовано безпеку під час дослідження, виконано розрахунок занулення та визначено вимоги щодо пожежної безпеки і надання долікарської допомоги потерпілим.

Основними результатами бакалаврської кваліфікаційної роботи є тестування 17 зразків комерційних LED-ламп, під час якого встановлено значні розбіжності між їхніми фактичними та паспортними енергетичними параметрами.

Дослідженням виявлено небезпечні лампи з критичним рівнем стробоскопічного ефекту, недопустимим флікером, низьким індексом загальної кольоропередачі та глибоким дефіцитом червоного випромінювання, що спричиняють зорову втому, психологічний дискомфорт та пригнічують секрецію мелатоніну.

Також розроблено комплекс заходів з охорони праці при проведенні дослідів в умовах абсолютної темряви з електрообладнанням.

Ключові слова: світлодіодна лампа, зоровий комфорт, індекс кольоропередачі, пульсація світлового потоку, стробоскопічний ефект, спектрометр, меланопічна фотометрія.

Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить – 83 сторінки, рисунків – 14, таблиць – 7, формули – 3, літературні джерела – 21.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСПУП	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Світлодіодні джерела світла та зоровий комфорт.....	11
1.2 Пульсації світлового потоку	12
1.3 Спектральний розподіл випромінювання	14
1.4 Колориметричні характеристики світла	15
1.5 Сучасні метрики якості світла (CRI, TM–30, PstLM, SVM)	17
1.5.1 Метрики передачі кольору: від CRI до TM–30	17
1.5.2 Метрики модуляції світла (флікеру): PstLM та SVM	18
1.5.3 Метрики біологічного впливу: Меланопічна фотометрія.....	19
Висновки до розділу 1.....	19
2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	21
2.1 Вимірювання пульсацій.....	21
2.2 Вимірювання колірних параметрів.....	23
2.3 Опис спектрометра (типу МК350S).....	25
2.4 Методика досліджу	26
Висновки до розділу 2.....	28
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩО ДО ЗАСТУВУВАННЯ	30
3.1 Об’єкти дослідження (лампи)	30
3.2 Результати вимірювання пульсацій.....	36
3.3 Спектральні характеристики джерел світла.....	39
3.4 Колірні параметри (CCT, CRI, R9).....	42
3.5 Оцінка відповідності фактичних світлотехнічних та колориметричних характеристик вимогам чинних стандартів	45
3.6 Вплив на людину	50
Висновки до розділу 3.....	52
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	59

4.1 Завдання в області охорони праці	59
4.2 Безпека під час проведення дослідження	60
4.3 Аналіз умов праці, виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів на об'єкті проектування	64
4.4 Розробка організаційних заходів з охорони праці	67
4.5 Розрахунок занулення.....	69
4.6 Долікарська допомога потерпілим при нещасних випадках	72
4.7 Забезпечення пожежної безпеки	74
Висновки до розділу 4.....	77
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СП – світловий прилад

CRI – Color Rendering Index (Індекс передачі кольору)

PstLM – Short-Term Light Modulation (Короткочасна модуляція світла)

SVM – Stroboscopic Visibility Measure (Міра видимості стробоскопічного ефекту)

SDCM – Standard Deviation of Color Matching (Стандартне відхилення колірної відповідності)

LED – Light-Emitting Diode (Світловипромінювальний діод (СВД) або світлодіод)

ВСПУП

Актуальність теми. Масове впровадження світлодіодних (LED) джерел світла суттєво змінило підходи до організації штучного освітлення. Попри очевидні енергетичні та експлуатаційні переваги, якість світлового середовища, створюваного сучасними світлодіодами, залишається предметом активних наукових дискусій. Традиційні показники оцінки освітлення часто не здатні повною мірою схарактеризувати фізіологічний вплив LED-випромінювання на зоровий апарат людини.

Проблеми пульсації світлового потоку (флікер-ефект), специфічний спектральний розподіл із вираженим «синім піком» та недосконала передача кольору в бюджетних лампах можуть призводити до швидкої зорової втоми, зниження концентрації та порушення циркадних ритмів. У зв'язку з цим у сучасній світлотехніці на зміну базовому індексу CRI приходять нові, точніші метрики оцінки якості світла, такі як TM-30, а для оцінки пульсацій — індекси PstLM та SVM.

Комплексне дослідження спектральних, колориметричних характеристик та пульсацій світлодіодних ламп із застосуванням сучасного вимірювального обладнання та новітніх метрик є вкрай актуальним завданням для забезпечення зорового комфорту та збереження здоров'я користувачів. На відміну від існуючих підходів, поєднання аналізу параметрів пульсації світлового потоку та сучасних колориметричних і спектральних характеристик дозволяє більш повно оцінити якість освітлення та його вплив на зоровий комфорт людини.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є комплексне дослідження визначення світлотехнічних та колориметричних характеристик світлодіодних джерел світла, оцінці рівня їхніх пульсацій та аналізі впливу цих параметрів на зоровий комфорт людини з використанням сучасних метрик якості світла.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Здійснити аналітичний огляд науково-технічної літератури щодо впливу характеристик LED-освітлення (пульсацій, спектрального розподілу) на зоровий комфорт та проаналізувати сучасні метрики оцінки якості світла (CRI, TM-30, PstLM, SVM).
2. Обґрунтувати методику проведення дослідів та описати апаратну базу дослідження, зокрема використання спектрометра (типу MK350S) для вимірювання кольірних та спектральних параметрів.
3. Провести серію дослідних вимірювань для обраних об'єктів дослідження (LED-ламп), зафіксувавши рівень пульсацій, спектральні характеристики та кольірні параметри (CCT, CRI, R9).
4. Проаналізувати отримані дослідні дані та оцінити їхній безпосередній фізіологічний вплив на людину.
5. Розглянути вимоги нормативних документів щодо охорони праці при роботі з електротехнічним та освітлювальним обладнанням.

Об'єкт дослідження: фізичне світлове середовище, створене сучасними світлодіодними лампами побутового та комерційного призначення.

Предмет дослідження: спектральний розподіл, колориметричні характеристики (CCT, CRI, R9), пульсації світлового потоку (PstLM, SVM) світлодіодних джерел світла та їхній вплив на показники зорового комфорту.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Світлодіодні джерела світла та зоровий комфорт

Сучасний етап розвитку світлотехніки характеризується тотальним переходом на світловипромінювальні діоди (СВД). Завдяки високій світловій віддачі та тривалому терміну служби вони витіснили більшість традиційних джерел світла. Проте, як зазначає Пітяков О.С., висока енергоефективність і довговічність не повинні бути єдиними критеріями їх вибору [1]. Широке впровадження СВД-освітлення актуалізувало проблему його фізіологічного впливу на людину. Динамічні зміни в цій галузі вимагають переходу до концепції інтелектуальних систем освітлення. Наприклад, впровадження елементів штучного інтелекту та машинного навчання в управління освітленням дозволяє ефективно адаптувати світлове середовище до потреб людського ока, мінімізуючи зорову втому протягом дня [7].

Фундаментальною основою зорового комфорту є фотобіологічна безпека. Дослідження, проведені Шпак С.В., Кожушко Г.М. та співавторами, акцентують увагу на тому, що масове використання LED-ламп загального призначення потребує суворого контролю за рівнем небезпеки синього світла (Blue Light Hazard). Тривалий вплив спектрально незбалансованого випромінювання викликає не лише дискомфорт та зорову втому (астенопію), але й може призводити до незворотних фотохімічних пошкоджень сітківки ока [8].

Особливу небезпеку в цьому контексті становить порушення фізіологічних механізмів адаптації ока, зокрема так званого «меланопсинового ефекту» звуження зіниці. У своїх працях Пітяков О.С. детально розглядає умови виконання «меланопсинового хреста» та його роль у забезпеченні зорового комфорту [1]. Суть проблеми полягає у специфіці рецепторів ока: природний захисний механізм (рефлекторне звуження зіниці) регулюється меланопсиновмісними гангліонарними клітинами сітківки, які мають

максимальну чутливість до випромінювання з довжиною хвилі близько 480 нм (блакитно-зелена ділянка спектра).

Більшість білих світлодіодів, побудованих за системою «синій кристал + жовтий люмінофор», мають виражений пік випромінювання у короткохвильовій синій зоні (450–460 нм), яка є найбільш фототоксичною.

При цьому в їхньому спектрі часто спостерігається значний «провал» саме в зоні 480 нм. Внаслідок цього виникає парадоксальна та небезпечна ситуація: через нестачу випромінювання, на яке реагує меланопсин, зіниця не звужується до безпечного діаметра. Вона залишається розширеною, і на очне дно безперешкодно потрапляє інтенсивна синя радіація (450 нм) від піку світлодіода. Це явище і є порушенням умов «меланопсинового хреста», що створює значний зоровий дискомфорт та підвищує ризик деградації макули (центральної частини сітківки) [1].

Таким чином, сучасне розуміння зорового комфорту в епоху світлодіодів виходить далеко за межі забезпечення нормативних показників кількісної освітленості. Воно визначається насамперед спектральною збалансованістю випромінювання, яка має відповідати критеріям фотобіологічної безпеки та гарантувати адекватні природні захисні реакції зорового апарату людини.

1.2 Пульсації світлового потоку

Проблема пульсації яскравості у світлодіодних лампах залишається однією з найбільш гострих у сучасній світлотехніці. На відміну від ламп розжарювання, які мають значну теплову інерційність вольфрамової нитки (що природним чином згладжує коливання), світлодіоди є безінерційними напівпровідниковими приладами. Вони миттєво реагують на будь-які зміни струму живлення. Тому якість світлового потоку LED-джерел цілком залежить від електронного драйвера, який перетворює змінну напругу мережі на постійний струм. З метою здешевлення продукції багато виробників

використовують спрощені схеми драйверів (без якісних згладжувальних конденсаторів), що призводить до перенесення мережових коливань (з частотою 100 Гц) безпосередньо у світловий потік.

У ґрунтовних дослідженнях Багірова С.А., Пітякова О.С. та Шпак С.В., присвячених аналізу комерційних зразків LED-ламп та світильників загального призначення, підкреслюється, що проблема флікеру має масовий характер [2]. Результати лабораторних вимірювань свідчать, що значна частина бюджетної світлодіодної продукції на ринку має коефіцієнт пульсацій, який значно перевищує допустимі санітарні норми. Зокрема, багато зразків виявилися абсолютно непридатними для використання в приміщеннях з комп'ютерною технікою, дошкільних та навчальних закладах, де нормативні вимоги жорстко обмежують глибину пульсацій.

Фізіологічний вплив пульсацій є надзвичайно підступним. Нежмаков П.І., Пітяков О.С., Шпак С.В. та співавтори у своїх працях зазначають, що навіть якщо пульсації не сприймаються оком візуально (це стосується частот понад 80–100 Гц), вони все одно чинять значний нейрофізіологічний вплив на організм [3]. Фоторецептори сітківки здатні фіксувати коливання світла на частотах до 300 Гц і передавати відповідні нервові імпульси до мозку. Тривала робота в умовах такого «невидимого» мерехтіння призводить до:

- перенапруження зорового апарату та швидкого розвитку астенопії;
- зниження працездатності, концентрації уваги та загального тону;
- виникнення головного болю, мігрень та підвищеної дратівливості.

Окрему небезпеку становить стробоскопічний ефект, який виникає при освітленні рухомих об'єктів пульсуючим світлом. Дослідники наголошують, що на виробничих підприємствах високочастотний флікер може створювати ілюзію нерухомості або сповільненого руху деталей верстатів (наприклад, фрез або циркулярних пилок), що є прямою причиною важкого виробничого травматизму [2, 3].

З огляду на ці фактори, Нежмаков П.І. та Шпак С.В. вказують на гостру необхідність впровадження жорсткішого метрологічного контролю за

параметрами драйверів. Традиційного вимірювання лише «коефіцієнта пульсацій» (відношення амплітуди до середнього значення) вже недостатньо, оскільки ця метрика не враховує частоту і форму сигналу. Сучасна оцінка безпеки освітлення вимагає переходу до комплексних метрик, що враховують часові характеристики модуляції світла та їхнє сприйняття нервовою системою людини [3].

1.3 Спектральний розподіл випромінювання

Спектральний склад світла є фундаментальною характеристикою, що визначає не лише колірні параметри джерела, а й його біологічну цінність та безпеку. На відміну від ламп розжарювання, що мають суцільний тепловий спектр, спектральний розподіл енергії (SPD) білих світлодіодів має специфічну структуру, зумовлену технологією їхнього виготовлення. У дослідженнях Шпак С.В., Кожушко Г.М. та Пітякова О.С. показано, що найбільш поширена конструкція СВД («синій кристал InGaN + жовтий люмінофор YAG:Ce») генерує спектр з двома характерними особливостями: вузьким інтенсивним піком у синій області (450–460 нм) та широким пологим максимумом у жовто-зеленій зоні (550–560 нм) [4, 8].

Така нерівномірність спектра є причиною виникнення декількох критичних проблем: фотобіологічна небезпека синього світла (Blue Light Hazard). Висока щільність випромінювання в діапазоні 400–500 нм збігається з максимумом функції фотохімічного пошкодження сітківки. Згідно з результатами вимірювань, представленими в [8], багато світлодіодних джерел зі світловою температурою понад 5000 К можуть належати до груп ризику RG1 або навіть RG2 за стандартом IEC 62471, що вимагає обмеження часу прямого споглядання на джерело. Спектральний «провал» та меланопічна ефективність: Назаренко Л.А. та Діденко О.М. у своїх працях з меланопічної фотометрії вказують на те, що традиційна світлова ефективність (у люменах) не враховує невізуальний вплив світла на людину [4]. Максимум чутливості

меланопсиновмісних гангліонарних клітин сітківки, які відповідають за регуляцію циркадних ритмів та звуження зіниці, припадає на 480 нм. Саме в цій зоні у типових LED спостерігається глибокий мінімум («ціановий провал»). Особливу увагу цій проблемі приділяє Пітяков О.С., описуючи концепцію «меланопсинового хреста» [1, 6].

Суть явища полягає у спектральній невідповідності: пік випромінювання СВД (450 нм) створює високе енергетичне навантаження на сітківку, проте через відсутність достатньої енергії на довжині хвилі 480 нм зіниця ока не отримує сигналу для адекватного звуження. Як наслідок, «захисна діафрагма» ока залишається відкритою, що призводить до надмірного опромінення фоторецепторів синім світлом. Це не лише спричиняє зоровий дискомфорт, а й пригнічує секрецію мелатоніну, порушуючи цикл «сон–бадьорість» [6, 10]. Для подолання цих недоліків сучасна світлотехніка рухається шляхом спектральної оптимізації. Назаренко Л.А. наголошує на важливості впровадження меланопічних коефіцієнтів при проєктуванні освітлення для різних типів приміщень: висока меланопічна облученість потрібна вранці для стимуляції активності, і низька – ввечері для підготовки організму до сну [4, 10]. Як зазначають Багіров С.А. та Шпак С.В., одним із перспективних шляхів покращення спектральної якості є використання технологій «Full Spectrum» (наприклад, SunLike), де синій кристал замінюється на фіолетовий (405 нм) з трьома люмінофорами. Це дозволяє заповнити «ціановий провал» та створити спектр, максимально наближений до природного, що забезпечує виконання умов «меланопсинового хреста» та гарантує високий рівень зорового комфорту [1, 10].

1.4 Колориметричні характеристики світла

Колориметричні характеристики світлодіодного випромінювання є ключовими параметрами, що визначають візуальний комфорт, естетичне сприйняття освітлюваного простору та здатність людини точно розрізняти

кольори. Оскільки світлодіоди генерують біле світло шляхом змішування випромінювання різних спектральних смуг (найчастіше синього кристала та жовто-зеленого люмінофора), забезпечення стабільних колірних параметрів є складною технологічною задачею.

Для комплексного опису кольору джерела світла використовують систему координат. Базовим параметром є корельована колірна температура (CCT), що вимірюється в Кельвінах (K) і визначає загальний відтінок світіння – від «теплого» жовтуватого (2700–3000 K) до «холодного» синюватого (6000–6500 K). Однак сама лише CCT не дає повної інформації про якість світла.

Для оцінки помітності цих колірних відхилень для людського ока використовують систему еліпсів МакАдама або кроки SDCM (Standard Deviation of Color Matching). Один крок SDCM означає, що відмінність у кольорі практично непомітна для зору. Європейські стандарти екодизайну вимагають, щоб для якісного внутрішнього освітлення розкид кольоровості не перевищував 3–4 кроків еліпса МакАдама.

У ґрунтовних дослідженнях енергоефективності та якості випромінювання LED-ламп, проведених Багіровим С.А., Шпак С.В., Пітяковим О.С. та іншими, виявлено значні проблеми з колориметричною стабільністю на сучасному ринку [6, 10]. Результати лабораторних вимірювань комерційних зразків внутрішнього освітлення (з CCT у діапазоні 3000–5500 K) показали, що відхилення координат кольоровості від номінальних значень у багатьох ламп сягає 7 і більше кроків еліпса МакАдама [10].

Такий високий рівень відхилення означає, що світильники з однакового маркуванням, встановлені в одному приміщенні, будуть візуально світитися різними відтінками (наприклад, один біло-зеленим, інший – біло-рожевим). Це не лише порушує естетику інтер'єру, але й створює додаткове зорове навантаження, оскільки очі змушені постійно переадаптовуватися до різних колірних умов у межах одного поля зору.

Крім того, дослідники зазначають, що деградація люмінофора під час експлуатації LED-лампи (через температурний режим) призводить до подальшого неконтрольованого зсуву колірних координат [6]. Тому забезпечення високої якості колориметричних параметрів є невід'ємною складовою створення комфортного світлового середовища.

1.5 Сучасні метрики якості світла (CRI, TM-30, PstLM, SVM)

Еволюція світлодіодного освітлення та глибше розуміння його впливу на організм людини призвели до того, що традиційні методи оцінки світлового середовища (які базувалися переважно на вимірюванні рівня освітленості в люксах та загального індексу передачі кольору) виявилися недостатніми. Сьогодні для комплексної оцінки якості СВД-джерел впроваджується розширений набір метрик, що охоплює колориметричні, модуляційні та біологічні параметри випромінювання.

1.5.1 Метрики передачі кольору: від CRI до TM-30

Історично базовим параметром оцінки якості передачі кольору є індекс CRI (Color Rendering Index). У дослідженнях Багірова С.А. зазначається, що більшість сучасних СВД-ламп внутрішнього освітлення забезпечують значення Ra на рівні 75–93 [10]. Проте ця метрика має суттєвий недолік: вона розраховується лише за 8 ненасиченими (пастельними) кольорами еталона і часто ігнорує здатність джерела відтворювати насичені червоні відтінки (індекс R₉), що є критичним для медичних, освітніх закладів та торговельних площ.

Для більш об'єктивної оцінки Міжнародним товариством інженерів-світлотехніків (IES) розроблено стандарт TM-30. Цей метод використовує 99

еталонних зразків кольору (що включають насичені кольори, відтінки шкіри, природні матеріали) і базується на двох основних індексах:

R_f (Fidelity Index) – індекс точності, який показує, наскільки колір об'єкта під досліджуваним джерелом збігається з його кольором під еталонним (сонячним) світлом;

R_g (Gamut Index) – індекс насиченості (колірного охоплення), що показує, чи робить джерело світла кольори більш яскравими або, навпаки, тьмяними.

1.5.2 Метрики модуляції світла (флікери): PstLM та SVM

Як зазначалося в підрозділі 1.2, класичний «коефіцієнт пульсацій» є застарілим, оскільки він враховує лише амплітуду коливань, ігноруючи їхню частоту та фізіологічні особливості зору. Роботи Нежмакова П.І., Шпак С.В., Пітякова О.С. та Багірова С.А. переконливо доводять необхідність переходу до сучасних метрик, що адекватно описують реакцію нервової системи на мерехтіння [2, 3]. В рамках політики екодизайну та нових європейських директив (зокрема, регламенту ЄС 2019/2020) впроваджено два ключові показники:

PstLM (Short-term light modulation) – показник короточасного мерехтіння. Оцінює видимі низькочастотні пульсації (в діапазоні від 0,3 до 80 Гц). Значення $PstLM = 1$ означає, що 50% спостерігачів з нормальним зором помітять мерехтіння.

SVM (Stroboscopic Visibility Measure) – міра видимості стробоскопічного ефекту. Ця метрика призначена для оцінки невидимих для ока високочастотних пульсацій (від 80 до 2000 Гц), які викликають приховану втому та небезпечні оптичні ілюзії на виробництві. Згідно з сучасними вимогами до якісного освітлення, значення SVM не повинно перевищувати 0,4 [2, 6].

1.5.3 Метрики біологічного впливу: меланопічна фотометрія

Найновішим напрямком в оцінці якості світла є врахування його невізуального (циркадного) впливу. Назаренко Л.А. та Діденко О.М. наголошують, що сучасні системи повинні оцінюватися за допомогою меланопічної фотометрії [4, 9]. Вводиться поняття меланопічної еквівалентної освітленості (mEDI) або меланопічного коефіцієнта дії випромінювання. Ця метрика кількісно оцінює, наскільки спектр конкретного світлодіода (з урахуванням умов «меланопсинового хреста», досліджених Пітяковим О.С. [1]) здатен стимулювати меланопсинові рецептори ока, впливаючи на розмір зіниці, концентрацію уваги та цикл сну.

Таким чином, сучасне проєктування світлодіодного освітлення вимагає багатовимірного аналізу: від енергоефективності (люмен/ват) та колірних координат до індексів TM-30, суворих показників флікеру (SVM) та метрик біологічної безпеки (mEDI).

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналітичного огляду літератури та аналізу сучасного стану розвитку світлотехніки можна зробити такі узагальнюючі висновки.

Зміна пріоритетів в оцінці освітлення. Тотальний перехід на світлодіодні джерела світла виявив, що висока енергоефективність та довговічність не можуть бути єдиними критеріями їх якості. Пріоритетним завданням сучасного проєктування освітлювальних систем є забезпечення зорового комфорту та фотобіологічної безпеки людини, що вимагає впровадження інтелектуальних систем адаптивного управління.

Критичність спектрального балансу. Специфічний спектр поширених СВД-ламп (з інтенсивним синім піком та «ціановим провалом» на рівні 480 нм) несе пряму фотобіологічну небезпеку. Це призводить до порушення умов

«меланопсинового хреста» – відсутності рефлекторного звуження зіниці, що спричиняє надмірне опромінення сітківки токсичним синім світлом, зорову втому та збій циркадних ритмів (пригнічення мелатоніну). Вирішенням є перехід на джерела типу «Full Spectrum», які імітують природне сонячне світло.

Небезпека прихованого мерехтіння та колірних відхилень. Масове використання здешевлених драйверів живлення призводить до високого рівня високочастотних пульсацій, які, хоч і не помітні візуально, чинять руйнівний нейрофізіологічний вплив та створюють небезпечний стробоскопічний ефект на виробництві. Крім того, наявність значних відхилень кольоровості (понад 7 кроків еліпса МакАдама) у комерційних зразках створює дискомфортне строкате світлове середовище, що посилює зорове навантаження.

Необхідність переходу на сучасні метрики. Традиційні підходи до вимірювання якості світла (через індекс CRI та класичний коефіцієнт пульсації) виявилися недостатніми та застарілими. Об'єктивна оцінка та створення безпечного світлового середовища сьогодні неможливі без застосування комплексного підходу, який включає:

- стандарт TM-30 (індекси R_f та R_g) для всебічної оцінки передачі кольору;
- показники PstLM та SVM для жорсткого контролю видимого та невидимого флікеру;
- методи меланопічної фотометрії (mEDI) для прогнозування біологічного та циркадного впливу випромінювання на організм людини.

Загалом, аналіз свідчить про необхідність посилення метрологічного контролю за якістю світлодіодної продукції та обов'язкового врахування не лише фізичних, а й фізіологічних аспектів взаємодії штучного світла з зоровим апаратом та нервовою системою людини.

2 СВІЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вимірювання пульсацій

Вимірювання пульсацій світлового потоку за допомогою спектрометра UPRtek MK350S Premium є одним із найточніших методів оцінки якості освітлення. Завдяки високій частоті дискретизації, що сягає 100 кГц, цей прилад дозволяє не просто зафіксувати наявність мерехтіння, а й детально розкласти його на складові. Це критично важливо для глибокого дослідження впливу світлодіодних джерел на зоровий комфорт та загальну стомлюваність зору.

Процес вимірювання. Підготовка до тестування вимагає дотримання суворих лабораторних умов: для отримання достовірних та еталонних результатів вимірювання необхідно проводити в абсолютно темній кімнаті. Це критично важливо, оскільки будь-яке стороннє освітлення від вікон чи інших ламп створить паразитний фон. Цей фон неминуче змінить загальний рівень освітленості і суттєво спотворить математичний розрахунок відсотка пульсацій та індексів досліджуваного джерела світла.

Робота з самим приладом починається з обов'язкової ініціалізації та калібрування темряви (Dark Calibration) із закритою кришкою сенсора, що дозволяє усунути теплові шуми матриці. Після цього кришку знімають, а сенсор приймача розташовують паралельно джерелу світла або безпосередньо в робочій площині, наприклад, на поверхні столу. Це допомагає максимально точно імітувати кут падіння світла на очі. Далі в головному меню необхідно перейти до режиму Flicker, дочекатися стабілізації графіка на екрані та зафіксувати показники. Для отримання об'єктивної картини рекомендується проводити виміри в кількох різних точках освітлюваної зони, зберігаючи при цьому повну темряву щодо інших джерел [15].

Ключові метрики приладу. Спектрометр MK350S надає розгорнуту картину мерехтіння, аналізуючи одразу кілька важливих показників. Базовою

метрикою є Відсоток пульсацій (Percent Flicker), який відображає відносну різницю між максимальною ($E_{\max}$) та мінімальною ($E_{\min}$) освітленістю за один період коливання. Розрахунок відбувається за формулою:

$$\text{Percent Flicker} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Згідно із санітарними нормами, для комфортної тривалої роботи за монітором або читання цей показник не повинен перевищувати 5%.

Більш складною та точною метрикою є Індекс пульсацій (Flicker Index). Він враховує форму кривої освітленості, що особливо актуально для складних форм ШІМ-регулювання в LED-драйверах. Цей індекс розраховується як відношення площі графіка над лінією середньої освітленості до загальної площі під кривою за один період, і нормою вважається значення менше 0.1.

Для оцінки впливу рухомих об'єктів використовується показник SVM (Stroboscopic Effect Visibility Measure). Він визначає видимість стробоскопічного ефекту, коли механізми в русі можуть здаватися нерухомими або рухатися стрибками. Значення SVM менше 0.4 означає, що такий ефект є непомітним для людського ока.

Крім того, прилад вимірює Pst LM (Short-term light modulation) – показник короточасного мерехтіння на низьких частотах від 0.3 до 80 Гц. Саме такі частоти безпосередньо сприймаються оком і викликають найбільший неврологічний дискомфорт. Нормативним значенням для якісного LED-освітлення є Pst LM, що не перевищує 1.0 [16].

Інтерпретація отриманих даних дозволяє зробити висновки про якість апаратної частини освітлювального приладу. Високий відсоток пульсацій при частоті 100 Гц зазвичай свідчить про використання дешевого лінійного драйвера або про відсутність якісного згладжувального конденсатора після діодного моста. Натомість висока частота пульсацій, від 1000 Гц і більше, є характерною для систем із ШІМ-димуванням. У таких випадках відсоток

пульсацій може сягати 100%, проте людське око цього не фіксує напряду. Для коректної оцінки зорового комфорту в подібних ситуаціях ключову увагу слід приділяти саме показникам SVM та Flicker Index.

2.2 Вимірювання колірних параметрів

Вимірювання колірних параметрів світлодіодних ламп є обов'язковою складовою для комплексної оцінки їхньої якості та впливу на зорове сприйняття. До основних колірних характеристик, які підлягають дослідженню та порівнянню із заявленими даними виробника, належать корельована колірна температура (CCT) та колірні координати (x, y).

Для проведення точних вимірювань цих параметрів використовується спектрометр UPRtek MK350S Premium у комплексі з фотометричною кулею. Важливою особливістю світлодіодів білого світіння є те, що співвідношення синього і жовто-зеленого світла, яке виходить за межі кристала та люмінофора, визначає кінцеву колірність джерела. Оскільки синє світло розповсюджується в люмінофорі по значно коротшому шляху під малими кутами до оптичної осі, це часто призводить до кутової нерівномірності колірності світла.

Зміну співвідношення в спектрі між синім та жовто-зеленим світлом під різними кутами спостереження оцінюють саме за значеннями CCT: при високих колірних температурах переважає синя складова, і навпаки. Щоб нівелювати вплив цієї нерівномірності та отримати максимально точні усереднені значення для всієї лампи, вимірювання необхідно проводити у фотометричній кулі, де світловий потік рівномірно розподіляється за рахунок багаторазових відбиттів від внутрішньої поверхні.

Для надійного та геометрично правильного з'єднання вимірювального приладу з установкою ефективно застосовувати спеціально спроектований та виготовлений на 3D-принтері допоміжний пристрій (перехідник). Цей конструктивний елемент дозволяє жорстко та щільно приєднати приймальний

датчик спектрофотометра UPRtek MK350S до вимірювального вікна фотометричної кулі. Запропоноване вдосконалення не лише спрощує технологічність процесу, але й суттєво збільшує продуктивність та повторюваність результатів під час масового проведення спектрофотометричних вимірювань колірних параметрів різних зразків освітлювальних приладів.

Отримані таким чином об'єктивні дані колірних координат та фактичної температури дозволяють точно класифікувати джерело світла та виявити відхилення від номінальних параметрів, вказаних виробником (наприклад, заявлені 4000 K проти фактичних 4135 K чи 3853 K).

Безпечний рівень мерехтіння в області частот до 90 Гц визначається показником короткострокової дози $P_{st\ LM}$ згідно з міжнародним стандартом IEC TR 61547-1 [15] і утворюється при $P_{st\ LM} < 1$. Безпечний рівень видимості стробоскопічного ефекту в інтервалі частот до 1250 Гц визначається показником видимості стробоскопічного ефекту SVM згідно з IEC TR 63158 [16] і утворюються при $SVM < 1$. Індекс мерехтіння FI має не перевищувати значення 0,1. Глибина модуляції в інтервалі частот 90 – 3000 Гц має бути чисельно меншою $0,08 \cdot f$, де f – частота в герцах.

На основі досліджень встановлено, що більша частина світлодіодної продукції, що поступає на ринок України має безпечний рівень модуляції світла та показника видимості стробоскопічного ефекту.

Сучасний рівень технології виробництва світлодіодної продукції має потенціал до подальшого зменшення рівня модуляції світла і забезпечення 94 повної відсутності ризику від мерехтіння. Заміна ламп розжарювання та розрядних ламп на світлодіодні лампи та світильники дозволить повністю вирішити проблему мерехтіння та утворення стробоскопічного ефекту в освітленні.

2.3 Опис спектрометра (типу MK350S)

Спектрометр UPRtek MK350S Premium є портативним високоточним вимірювальним приладом еталонного класу, призначеним для комплексного спектрального, фотометричного та колориметричного аналізу джерел освітлення. Апаратна база пристрою побудована на основі лінійного CMOS-сенсора, а його косинусна приймальна поверхня оптимізована для відповідності вимогам стандартів люксометрів JIS C 1609-1:2006 (загальний клас AA) та DIN 5032 частина 7 (клас B).

Прилад здійснює спектральний аналіз у діапазоні видимого випромінювання від 380 до 780 нм із кроком вимірювання 1 нм та спектральною смугою пропускання близько 12 нм. Це дозволяє виконувати розгорнутий аналіз колірних характеристик джерел світла, включаючи визначення корельованої колірної температури (CCT), координат кольоровості за системами CIE 1931 та CIE 1976, індексу передачі кольору (CRI, зокрема розширених параметрів R1-R15), а також оцінку за новітнім стандартом IES TM-30-15 (обчислення індексу точності R_f та індексу насиченості R_g). Динамічний діапазон вимірювання загальної освітленості приладом становить від 1 до 150 000 люкс. Крім того, можливості спектрометра дозволяють оцінювати рівень небезпеки синього випромінювання (Blue Light Hazard) відповідно до міжнародних стандартів IEC TR 62778 та IEC 62471, обчислюючи зважену енергетичну освітленість синього світла та визначаючи групу ризику [17].

Окремої уваги заслуговує розширений функціонал аналізу параметрів пульсацій (флікеру) освітлювальних приладів. Завдяки високій частоті дискретизації, що становить 100 000 вимірювань на секунду (100 кГц), спектрометр здатний фіксувати коливання світлового потоку в широкому частотному діапазоні від 5 до 50 000 Гц. Такі апаратні можливості забезпечують точний математичний розрахунок критичних метрик зорового комфорту, до яких належать відсоток пульсацій (Percent Flicker), індекс

пульсацій (Flicker Index) та показник видимості стробоскопічного ефекту (SVM).

Для забезпечення високої достовірності та еталонності результатів вимірювальний процес вимагає дотримання суворих методологічних умов. Проведення тестування повинно обов'язково відбуватися в абсолютно темній кімнаті, щоб повністю виключити будь-який вплив паразитного фонового освітлення, яке здатне суттєво спотворити загальний рівень освітленості та розрахунки індексів пульсацій. Перед кожним циклом вимірювань обов'язковою процедурою є виконання ініціалізації та калібрування темряви (Dark Calibration) із закритою кришкою оптичного сенсора. Ця вбудована функція дозволяє нівелювати шумові перешкоди, спричинені змінами температури та навколишнього середовища, програмно віднімаючи теплові шуми самої CMOS-матриці. Керування спектрометром здійснюється через вбудований 4,3-дюймовий резистивний сенсорний екран. Для розширеного наукового аналізу та збереження масивів даних передбачена можливість роботи в автономному режимі зі збереженням на SD-карту, бездротове керування через Wi-Fi з мобільними додатками, а також підключення до персонального комп'ютера через USB-інтерфейс для роботи зі спеціалізованим програмним забезпеченням uSPECTRUM, uFlicker [18].

2.4 Методика досліджу

Дослідження світлотехнічних, колориметричних параметрів та показників пульсації світлодіодних джерел світла проводилися з використанням двох різних фотометричних установок. Для забезпечення високої точності та достовірності результатів, усі вимірювання виконувалися в спеціально обладнаній абсолютно темній кімнаті. Це дозволило повністю виключити вплив паразитного фонового освітлення на чутливу матрицю вимірювального приладу.

Живлення досліджуваних ламп здійснювалося від еталонного лабораторного блока живлення. Це гарантувало подачу стабілізованої напруги та виключало вплив коливань зовнішньої електромережі на роботу драйверів світлодіодних ламп.

Для проведення комплексного аналізу застосовувалися дві методики вимірювання.

Методика 1: вимірювання з використанням гоніофотометра GO-2000

Цей метод застосовувався для дослідження характеристик джерела світла у відкритому просторі. Дослідний зразок (світлодіодна лампа) встановлювався на поворотний механізм гоніофотометра. Після подачі стабілізованої напруги від лабораторного блока живлення лампа витримувалася в увімкненому стані протягом 30 хвилин. Цей період термостабілізації є обов'язковим для того, щоб кристали світлодіодів та електронні компоненти драйвера вийшли на свій номінальний робочий температурний режим, оскільки нагрів суттєво впливає на світловий потік та спектр випромінювання. Після завершення періоду термостабілізації сенсор спектрометра UPRtek MK350S Premium орієнтувався на джерело світла, і проводилася фіксація показників.

Методика 2: вимірювання з використанням фотометричної кулі діаметром 1м.

Для отримання усереднених інтегральних характеристик джерела світла (загального спектрального розподілу, індексів передачі кольору тощо) конструкцію наявної фотометричної кулі було апаратно вдосконалено. В рамках дипломного проєкту було розроблено та виготовлено спеціальний перехідник-адаптер, який дозволив замінити застарілий селеновий фотоелемент на сучасний високоточний сенсор спектрометра MK350S Premium. Завдяки цій модернізації прилад отримав здатність інтегрувати весь світловий потік, що багаторазово відбивається від внутрішньої поверхні кулі [19].

Загальний алгоритм проведення вимірювань:

1. Підготовка приміщення: забезпечення умов абсолютної темряви в лабораторії (відключення всіх сторонніх джерел світла, закриття вікон світлонепроникними матеріалами).
2. Монтаж зразка: встановлення досліджуваної лампи на гоніофотометр або її фіксація всередині фотометричної кулі.
3. Подача живлення: увімкнення еталонного лабораторного блока живлення із заданими номінальними параметрами струму та напруги.
4. Термостабілізація: витримка досліджуваної лампи в робочому стані протягом 30 хвилин для досягнення теплової рівноваги системи.
5. Ініціалізація спектрометра: увімкнення приладу MK350S Premium та обов'язкове проведення процедури «калібрування темряви» (Dark Calibration) із закритою кришкою сенсора для усунення апаратних теплових шумів матриці.
6. Зняття показників: встановлення спектрометра в розроблений перехідник фотометричної кулі (або напроти гоніофотометра) та проведення серії вимірювань. Прилад фіксував повний спектр фотометричних даних, включаючи освітленість, колірну температуру (CCT), індекси передачі кольору (CRI, TM-30), а також детальні метрики пульсацій (Percent Flicker, Flicker Index, SVM).
7. Експорт даних: збереження отриманих результатів у вигляді цифрових масивів на SD-карту або пряма передача на ПК для подальшого математичного та статистичного аналізу.

Висновки до розділу 2

На основі викладеного у другому розділі матеріалу щодо методів, обладнання та методики дослідження світлодіодних ламп можна зробити низку важливих висновків. Для проведення комплексного світлотехнічного, колориметричного аналізу та вимірювання пульсацій як еталонну апаратну базу обрано високоточний портативний спектрометр UPRtek MK350S

Premium. Його висока частота дискретизації на рівні 100 кГц та здатність відсікати апаратні шуми матриці за допомогою функції калібрування темряви забезпечують лабораторну точність результатів.

При цьому сформовано чіткі критерії оцінки зорового комфорту: встановлено, що якість апаратної частини LED-ламп має оцінюватися за комплексними сучасними метриками, де безпечним для зору визначено рівень короточасного мерехтіння PstLM, що не перевищує 1.0, та показник видимості стробоскопічного ефекту SVM менше або дорівнює 0.9 (а для повної непомітності – менше 0.4). Важливим практичним етапом роботи стала модернізація наявної фотометричної кулі діаметром 1 метр.

Завдяки розробці та виготовленню на 3D-принтері спеціального перехідника-адаптера вдалося замінити застарілий селеновий фотоелемент на сучасний сенсор спектрометра. Таке вдосконалення дозволило ефективно інтегрувати весь світловий потік та повністю нівелювати кутову нерівномірність колірності (зокрема, корельованої колірної температури), яка часто притаманна світлодіодним джерелам світла через особливості нанесення люмінофора. Крім того, для усунення похибок було затверджено строгу методику досліду, яка включає два типи випробувань: дослідження характеристик у відкритому просторі на гоніофотометрі GO-2000 та вимірювання інтегральних значень у фотометричній кулі [20].

Обґрунтовано необхідність мінімізації зовнішніх факторів впливу, що вимагає суворого дотримання двох критичних умов: проведення вимірів в умовах абсолютної темряви для уникнення паразитного фонового освітлення та обов'язкова термостабілізація досліджуваних зразків протягом 30 хвилин під час живлення від еталонного лабораторного джерела. Загалом, розроблена методика та підготовлена матеріально-технічна база дозволяють перейти до безпосереднього проведення дослідницьких вимірювань із гарантією високої достовірності та повторюваності отриманих результатів.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩО ДО ЗАСТУВУВАННЯ

3.1 Об'єкти дослідження (лампи)

Основним завданням третьої частини є комплексний аналіз характеристик світлодіодних ламп побутового призначення та оцінка їхньої відповідності заявленим параметрам, що є критично важливим для забезпечення належного рівня зорового комфорту. Об'єктами дослідження були обрані 17 зразків ламп від різних виробників (IEK, Тесро, NANOTEX, Lightmaster, ELM, MAXUS, економка та 1G1N) з різними експлуатаційними характеристиками. Зовнішній вигляд типових об'єктів дослідження на прикладі ламп під номерами №10 (MAXUS) та №13 (економка) наведено на рисунках 3.1 та 3.2 відповідно.

Для виявлення розбіжностей між паспортними даними та реальними параметрами джерел світла було проведено серію лабораторних вимірювань.

Вимірювання фактичних світлотехнічних та колориметричних характеристик здійснювалося з використанням прецизійного спектрометра UPRtek MK350S, та гоніофотометру GO-2000, з дотриманням норм вимірювання це:

1. Дослідження проводилося в абсолютно чорній кімнаті.
2. Витримка часу для стабілізації напруги та струму на лампі та її нагріву .

Що дозволило отримати високоточні дані для подальшого аналізу. В таблиці 3.1 наведено порівняння показників, заявлених виробником, із фактичними даними, зафіксованими під час дослідів.

Таблиця 3.1 – Порівняння показників від виробника та фактичних даних

№ лампи	Номинальна потужність, Вт.	Фактична потужність Вт.	Номинальний світловий потік люм.	Фактичний світловий потік люм.	Номинальна колірна температура К.	Фактична колірна температура К.	Виробник
1	2	3	4	5	6	7	8
1	6	5.27	600	722	2700	2920	IEK
2	9	7.45	1080	875	2700	2596	IEK
3	9	8.38	900	927	3000	2937	–
4	6	5.19	470	387	3000	2949	Tecro
5	6	5.87	510	428	3000	2932	NANOTEX
6	7	5.95	540	547	2700	2949	Lightmaster
7	7	5.83	560	580	4000	4135	Lightmaster
8	8	7.37	550	714	4000	4030	ELM
9	12	11.19	–	1048	4000	3853	–
10	5	4.58	–	380	4100	3941	MAXUS
11	7	6.56	580	718	4200	3873	economka
12	7	6.57	580	722	4200	3787	economka
13	7	6.63	580	729	4200	3847	economka
14	12	7.13	–	299	–	7490	–
15	9	5.70	–	278	–	7262	–
16	–	6.70	–	968	–	5864	1G1N
17	–	6.80	–	972	–	5927	1G1N

На рисунках 3.1, 3.3 зображені об'єкти дослідження під номерами №1 та №17

На рисунках 3.2, 3.4 зображені їх спектральні характеристики.



Рисунок 3.1 – Об’єкт дослідження лампа №1

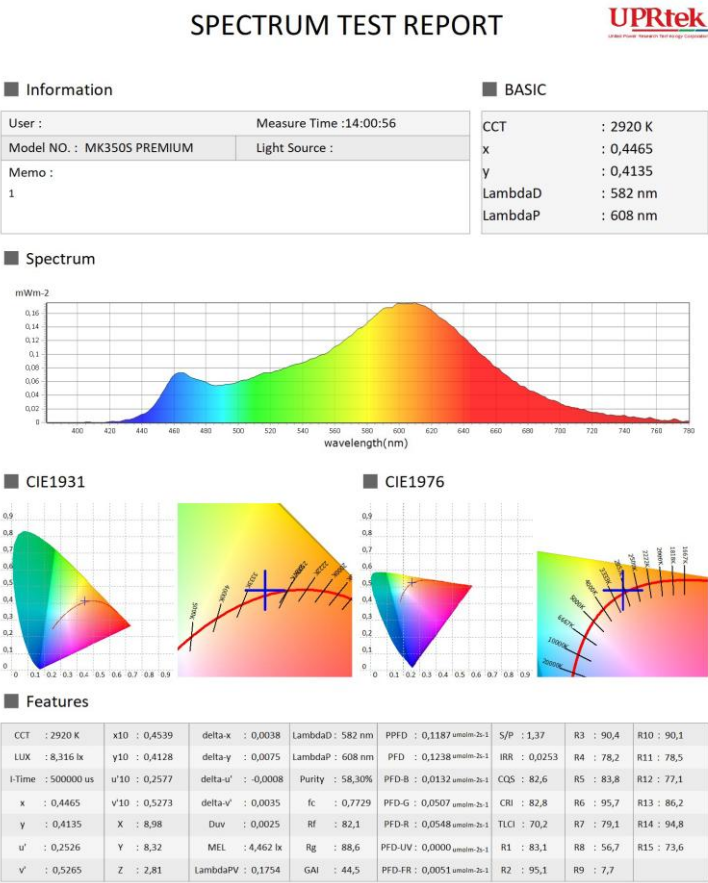


Рисунок 3.2 – Об’єкт дослідження лампа №1 спектральні характеристики



Рисунок 3.3 – Об’єкт дослідження лампа №17

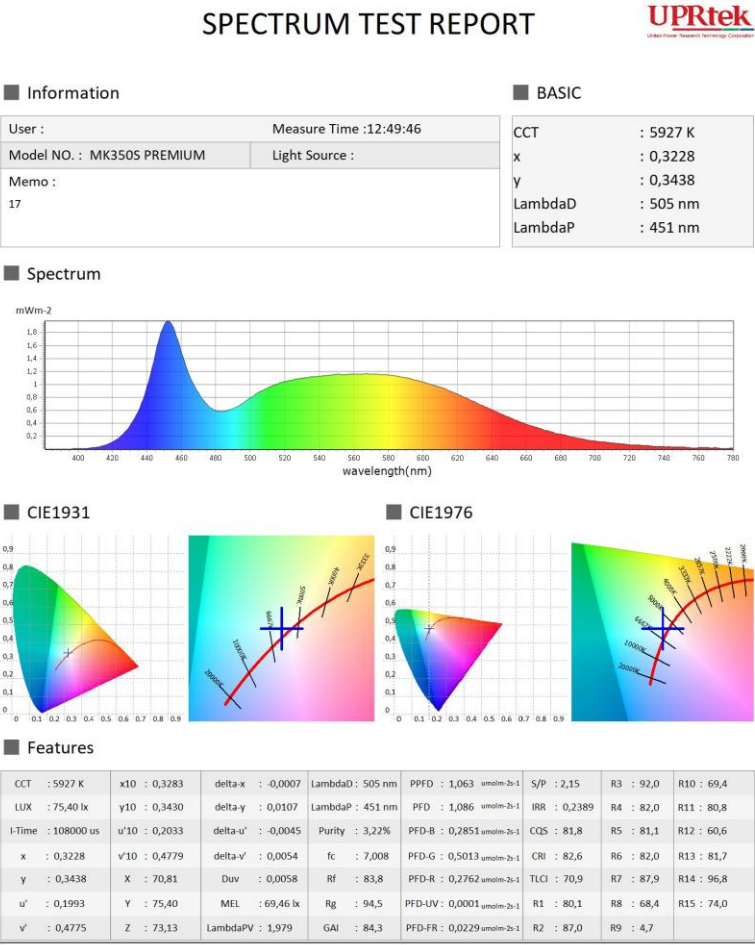


Рисунок 3.4 – Об’єкт дослідження лампа №17 спектральні характеристики

Аналіз результатів з таблиці 3.1 свідчить про наявність суттєвих відхилень фактичних параметрів від номінальних у більшості зразків:

- **Потужність:** значна частина ламп споживає менше електроенергії, ніж вказано на пакуванні. Наприклад, лампа №1 (ІЕК) при номіналі 6 Вт фактично споживає 5,27 Вт, а лампа №4 (Тесго) замість 6 Вт демонструє потужність 5,19 Вт.

- **Світловий потік:** зафіксовано як суттєве зниження, так і завищення цього показника. Для лампи №2 (ІЕК) фактичний світловий потік (875 лм) виявився значно нижчим за заявлені 1080 лм. Натомість лампа №8 (ELM) згенерувала 714 лм при заявленому номіналі у 550 лм.

- **Колірна температура (CCT):** спостерігається нестабільність колірної температури, що може безпосередньо впливати на психофізіологічне сприйняття освітленого простору. Зокрема, лампа №10 (MAXUS) має заявлену температуру 4100 К, проте спектрометричні вимірювання зафіксували фактичне значення на рівні 3941 К.

Додатково було проведено вимірювання базових електричних параметрів при стандартній напрузі в мережі 230 В. Отримані значення напруги, струму, потужності, а також розраховані показники світловіддачі та коефіцієнта потужності зведено у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Електротехнічні характеристики дослідних об'єктів.

Номер лампи	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт	Світловий потік, лм	Світловіддача Лм/Вт	Cos ϕ
1	230	0.044	5.27	722	137.0	0.52
2	230	0.061	7.45	875	110.1	0.57
3	230	0.062	8.38	927	110.6	0.59
4	230	0.043	5.19	387	74.6	0.52
5	230	0.046	5.87	428	72.9	0.55

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
6	230	0.047	5.95	547	91.9	0.55
7	230	0.046	5.83	580	99.5	0.55
8	230	0.054	7.37	714	96.9	0.59
9	230	0.093	11.19	1048	98.1	0.52
10	230	0.061	4.58	380	83.0	0.33
11	230	0.045	6.56	718	109.5	0.58
12	230	0.049	6.57	722	109.9	0.58
13	230	0.051	6.63	729	110.0	0.57
14	230	0.033	7.13	299	41.9	0.94
15	230	0.027	5.70	278	48.8	0.92
16	230	0.051	6.70	968	114.5	0.57
17	230	0.052	6.80	972	142.9	0.57

Дані таблиці 3.2 дозволяють оцінити загальну енергоефективність (світловіддачу) та якість вбудованих драйверів живлення:

- **Світловіддача:** найбільшу ефективність перетворення електричної енергії у світлову продемонструвала лампа №17 (142,9 лм/Вт). Водночас найнижчий показник зафіксовано у лампи №14 – лише 41,9 лм/Вт, що є вкрай низьким результатом для сучасних LED-технологій.

- **Коефіцієнт потужності :** якість схемотехніки драйверів суттєво варіюється. Оптимальні показники коефіцієнта потужності близькі до одиниці, мають лампи №14 (0,94) та №15 (0,92). З іншого боку, лампа №10 характеризується низьким значенням (0,33), що свідчить про високий рівень генерації реактивної потужності.

3.2 Результати вимірювання пульсацій

Підрозділ присвячений дослідженню стабільності світлового потоку в часі. Рівень пульсації є одним із найважливіших критеріїв, що визначає якість освітлення та його безпосередній вплив на зоровий комфорт і втомлюваність під час тривалого перебування у приміщенні. Для комплексної оцінки мерехтіння використовувалися два сучасні стандартизовані параметри: показник короточасного дози флікера (PstLM) та показник стробоскопічного ефекту (SVM).

Отримані під час апаратних вимірювань результати зведено у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Таблиця виміряних даних.

Номер лампи	Frequency	SVM	PstLM
1	2	3	4
1	0,0078	0,0112	0,7487
2	0,0078	0,0018	0,0274
3	0,0078	0,0013	0,1186
4	0,0078	0,0101	0,3113
5	88,3672	0,0282	0,2535
6	0,0078	0,0216	0,2399
7	0,0078	0,0161	0,0179
8	88,3672	0,0186	0,4841
9	0,0078	0,0207	5,5059
10	88,3672	3,7667	0,6607
11	88,3672	0,0249	0,3580
12	88,3672	0,0250	0,2433
13	88,3672	0,0256	0,1838
14	88,3672	4,2673	0,2792
15	88,3672	4,2796	0,2960
16	0,0078	0,0105	0,1157

Продовження таблиці 3.3

17	0,0078	0,0092	0,0810
Ш1	0,0078	0,0060	0,0403
Ш2	0,0078	0,0060	0,0697
Ш3	0,0078	0,0049	0,0565
Ш4	0,0078	0,0045	0,0648
Ш5	0,0078	0,0045	0,0649
P1	0,0078	0,0123	0,4934
P2	0,0078	0,0053	0,2003
P3	0,0078	0,0130	0,1963
P4	0,0078	0,0106	0,2205
P5	0,0078	0,0027	0,2243
П1	0,0078	0,0230	0,0241
П2	0,0078	0,0188	0,0240
П3	0,0078	0,0222	0,0235
ТВ1	0,0078	0,0116	0,1024
ТВ2	0,0078	0,0072	0,5009
ТВ3	0,0078	0,0128	0,3599
ТВ4	0,0078	0,0069	1,1656

Аналіз цих даних дозволяє зробити висновки щодо якості роботи драйверів живлення, встановлених у досліджуваних зразках. Зафіксовані базові частоти пульсацій (Frequency) для більшості ламп поділяються на дві групи: близько 0,0078 Гц та 88,3672 Гц.

Детальний розгляд показника стробоскопічного ефекту (SVM) виявляє значну неоднорідність серед об'єктів дослідження:

- **Зразки з низьким рівнем пульсацій:** значна частина ламп демонструє відмінні результати з мінімальними значеннями SVM. Наприклад, лампа №3 має показник 0,0013, лампа №2 – 0,0018, а лампи серії Ш (Ш1–Ш5) стабільно показують значення в межах 0,0045–0,0060. Це свідчить про наявність якісних згладжуючих фільтрів у їхніх драйверах, що гарантує відсутність помітного стробоскопічного ефекту.

- **Зразки з критичним рівнем пульсацій:** разом з тим, виявлено групу ламп, які мають аномально високі значення SVM, що значно

перевищують допустимі норми. Зокрема, лампа №10 показала значення 3,7667, лампа №14 – 4,2673, а лампа №15 – 4,2796. Використання таких джерел світла створюватиме значне навантаження на нервову систему та зір.

Аналіз показника короткочасного флікера (PstLM), який характеризує видиме мерехтіння на низьких частотах, також вказує на наявність проблемних зразків. Хоча переважна більшість досліджуваних ламп має значення PstLM значно менше одиниці (наприклад, лампа №7 – 0,0179, П2 – 0,0240), зафіксовано суттєві відхилення. Лампа №9 продемонструвала критично високий показник PstLM на рівні 5,5059. Також підвищене значення зафіксовано у лампи ТВ4, де PstLM становить 1,1656.

Результати вимірювання пульсацій засвідчують, що далеко не всі лампи на ринку забезпечують рівне та стабільне світло. Наявність зразків із надмірно високими значеннями SVM та PstLM вимагає особливої уваги при проектуванні освітлювальних установок, оскільки їх експлуатація у житлових чи робочих приміщеннях неминуче призводитиме до погіршення візуального комфорту та зниження працездатності.

На рисунку 3.5 – 3.6 зображено рівень пульсацій досліджених ламп 1, 17.

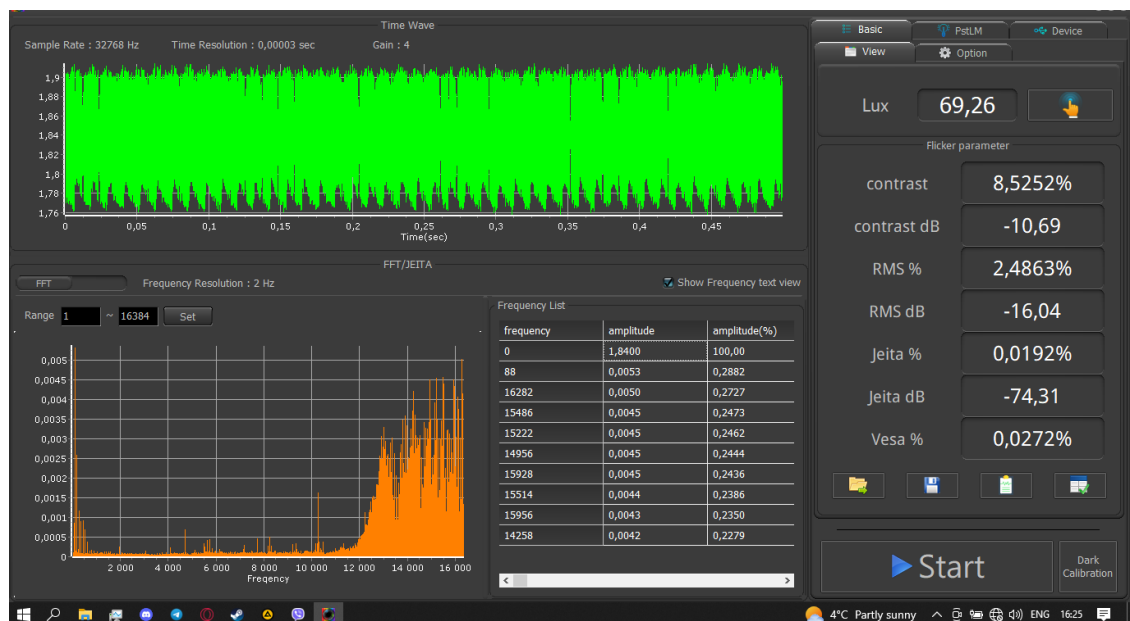


Рисунок 3.5 – Об'єкт дослідження лампа №17

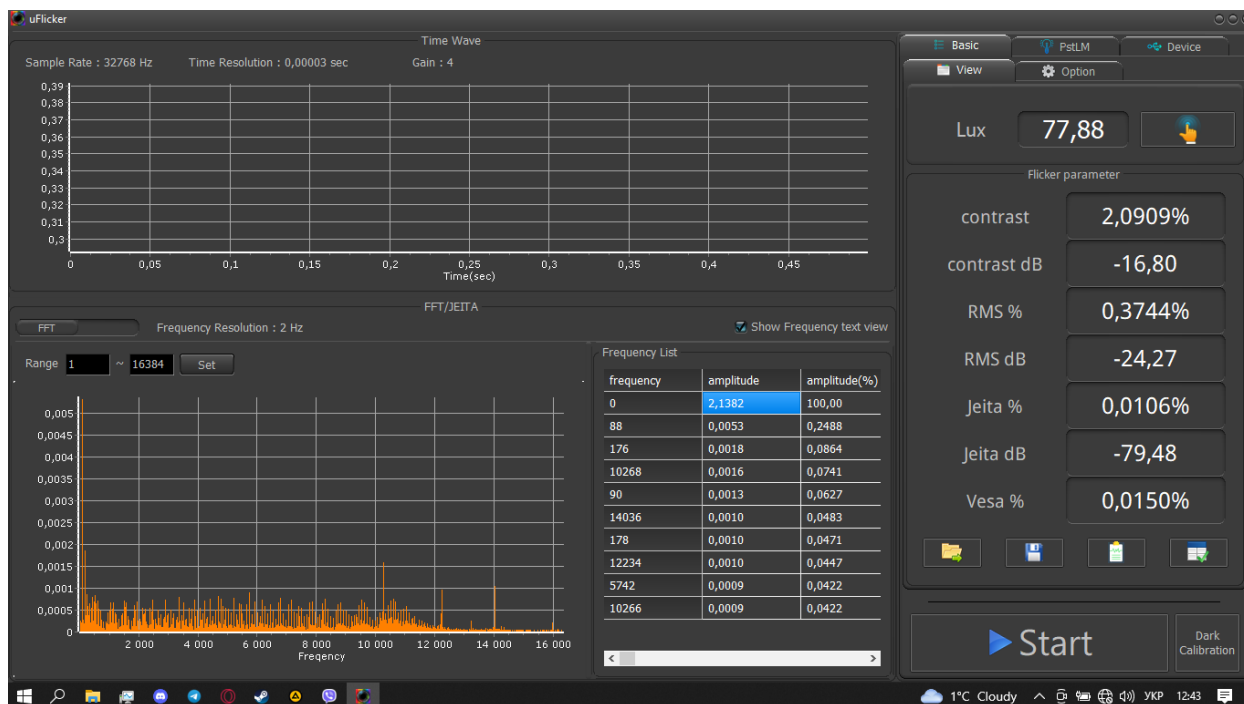


Рисунок 3.6 – Об'єкт дослідження лампа №17

3.3 Спектральні характеристики джерел світла

Аналіз спектральних характеристик досліджуваних джерел світла. Колірні координати x та y у поєднанні з корельованою колірною температурою (CCT) визначають колірність випромінювання ламп і дозволяють встановити їхнє точне положення на колориметричній діаграмі. Усі виміряні дані для 17 основних зразків, а також для контрольних груп ламп (серій Ш, Р, П, ТВ) зведені у таблицю 3.4

Таблиця 3.4 – Таблиця виміряних даних

№ лампи	ССТ	x	y
1	2	3	4
1	2920	0,4465	0,4135
2	2596	0,4712	0,4169
3	2937	0,4424	0,4076
4	2949	0,4405	0,4052
5	2932	0,4420	0,4059
6	2949	0,4393	0,4028
7	4135	0,3745	0,3726
8	4030	0,3813	0,3841
9	3853	0,3897	0,3894
10	3941	0,3836	0,3804
11	3873	0,3889	0,3896
12	3787	0,3908	0,3843
13	3847	0,3889	0,3860
14	7490	0,3025	0,3025
15	7262	0,3044	0,3076
16	5864	0,3241	0,3457
17	5927	0,3228	0,3438
III1	5961	0,3220	0,3451
III2	6133	0,3186	0,3410
III3	5940	03225	0,3450
III4	5693	0,3279	0,3512
III5	6030	0,3206	0,3430
P1	2661	0,4655	0,4157
P2	2895	0,4440	0,4056

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4
P3	2929	0,4424	0,4065
P4	3002	0,4363	0,4031
P5	2940	0,4423	0,4077
П1	3832	0,3912	0,3915
П2	3795	0,3933	0,3934
П3	3870	0,3891	0,3897
TB1	2977	0,4378	0,4033
TB2	2653	0,4647	0,4132
TB3	2653	0,4624	0,4091
TB4	3829	0,3894	0,3852

Аналіз результатів, представлених у таблиці, дозволяє розділити об'єкти дослідження на кілька груп залежно від їхнього спектрального складу:

- **Група теплого білого випромінювання (ССТ від 2596 К до 3002 К):** до цієї групи належать основні зразки №1–№6, а також контрольні лампи серії Р (Р1–Р5) та ТВ1–ТВ3. Для зазначених джерел характерне зміщення спектра у червоно–жовту область. Найнижче значення колірної температури зафіксовано у лампи №2 і становить 2596 К, при цьому її координати колірності дорівнюють $x = 0,4712$ та $y = 0,4169$. Для інших зразків цієї групи координати x варіюються в межах від 0,4363 (лампа Р4) до 0,4655 (лампа Р1), а координати y – від 0,4028 (лампа №6) до 0,4157 (лампа Р1).

- **Група нейтрального білого випромінювання (ССТ від 3787 К до 4135 К):** цю групу формують зразки №7–№13, лампи серії П (П1–П3) та зразок ТВ4. Координати колірності нейтральних ламп зосереджені ближче до центральної частини колориметричного простору. Значення координати x перебувають у діапазоні від 0,3745 (лампа №7) до 0,3933 (лампа П2), а

значення y – від 0,3726 (лампа №7) до 0,3934 (лампа П2). Такий розподіл є стандартним для класичних джерел нейтрально-білого спектра.

- **Група холодного білого та денного випромінювання (CCT понад 5500 К):** до цієї категорії увійшли лампи №14–№17 та зразки серії Ш (Ш1–Ш5). Для ламп №16, №17 та серії Ш значення CCT становлять від 5693 К до 6133 К, а їхні координати складають $x = 0,3186 \dots 0,3279$ та $y = 0,3410 \dots 0,3512$. Особливу увагу привертають лампи №14 та №15, які мають аномально високі показники колірної температури – 7490 К та 7262 К відповідно. Їхні координати колірності складають $x = 0,3025$, $y = 0,3025$ (для №14) та $x = 0,3044$, $y = 0,3076$ (для №15), що вказує на значну концентрацію випромінювання у короткохвильовій синій області спектра.

Отримані результати свідчать про суттєву відмінність у спектральному складі досліджуваних ламп. Виявлений значний зсув спектра ламп №14 та №15 у синю область є передумовою для більш детального аналізу їхніх колірних параметрів (CRI та R9) у наступному підрозділі, оскільки такий спектральний склад може критично впливати на зорову втому та загальний рівень візуального комфорту.

3.4 Колірні параметри (CCT, CRI, R9)

Детальний аналіз показників якості кольоропередачі досліджуваних джерел світла, що є одним із ключових чинників забезпечення візуального комфорту та природного сприйняття навколишнього середовища. Основними критеріями оцінки виступали загальний індекс кольоропередачі (Ra або CRI) та спеціальний індекс відтворення насиченого червоного кольору (R9). Отримані під час спектрометричних вимірювань результати для всіх дослідних зразків та контрольних груп (серій Ш, Р, П, ТВ) зведено у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Виміряні данні CCT, CRI, R9

№ лампи	CCT	CRI	R9
1	2	3	4
1	2920	82,8	7,7
2	2596	82,5	9,2
3	2937	82,1	5,8
4	2949	81,4	4,4
5	2932	82,2	6,2
6	2949	82,8	7,5
7	4135	84,0	12,4
8	4030	82,7	10,0
9	3853	87,4	85,4
10	3941	82,5	9,5
11	3873	82,3	4,1
12	3787	83,1	10,0
13	3847	83,0	8,6
14	7490	69,2	-7,6
15	7262	68,0	-17,3
16	5864	82,3	4,2
17	5927	82,6	4,7
Ш1	5961	83,35	6,7
Ш2	6133	83,6	7,9
Ш3	5940	82,75	5,6
Ш4	5693	82,62	4,5
Ш5	6030	83,11	6,8
P1	2661	82,24	7,1

Продовження таблиці 3.5

P2	2895	81,58	2,9
P3	2929	81,79	4,1
P4	3002	82,03	4,9
P5	2940	81,68	3,9
П1	3832	81,61	5,0
П2	3795	81,35	3,4
П3	3870	81,34	4,4
TB1	2977	82,29	5,7
TB2	2653	82,48	8,0
TB3	2653	82,33	7,8
TB4	3829	82,83	8,8

Аналіз даних дозволяє виявити чіткі закономірності та суттєві відмінності в якості випромінюваного світла між різними зразками:

- **Загальний індекс кольоропередачі (CRI):** переважна більшість досліджуваних ламп побутового призначення (зразки №1–№8, №10–№13, №16, №17), а також контрольні серії Ш, Р, П та ТВ мають значення CRI в межах від 81,3 до 84,0. Це відповідає базовим нормативним вимогам до джерел світла внутрішнього загального освітлення ($CRI \geq 80$), забезпечуючи прийнятний рівень відтворення колірних відтінків. Найвищу якість кольоропередачі серед основних об'єктів продемонстрував зразок №9, чий індекс CRI сягає 87,4. Водночас зразки №14 та №15 показали незадовільні результати – їхні індекси CRI становлять лише 69,2 та 68,0 відповідно, що свідчить про серйозне спотворення колірних характеристик об'єктів під таким освітленням.

- **Спеціальний індекс кольоропередачі червоного кольору (R9):** параметр R9 є критично важливим для житлових і навчальних приміщень, оскільки червона складова спектра безпосередньо впливає на точне

відтворення відтінків людської шкіри, деревообробних матеріалів інтер'єру та продуктів харчування. У більшості протестованих ламп та контрольних груп значення R9 коливається в доволі низькому, проте типовому для бюджетних LED-драйверів діапазоні – від 2,9 (лампа P2) до 12,4 (лампа №7).

- **Екстремальні відхилення індексу R9:** на загальному тлі яскраво виділяється зразок №9, у якого значення R9 становить рекордні 85,4, що вказує на використання високоякісного люмінофора з розширеним червоним спектром випромінювання. На противагу цьому, зразки №14 та №15 продемонстрували глибокі від'ємні значення індексу – -7,6 та -17,3 відповідно. Такий гострий дефіцит довгохвильового червоного випромінювання у спектрі ламп №14 та №15 призводитиме до того, що освітлювані предмети виглядатимуть блякими, сірими або неприродно синюватими.

Таким чином, результати колориметричних досліджень свідчать, що висока колірна температура (як у ламп №14 та №15 із CCT понад 7000 K) у побутових LED-джерелах часто досягається за рахунок надмірного синього піку при одночасному пригніченні червоної області спектра. Це призводить до критичного падіння індексів CRI та R9, роблячи такі лампи непридатними для тривалого перебування людей з точки зору візуальної ергономіки та екології світла.

3.5 Оцінка відповідності фактичних світлотехнічних та колориметричних характеристик вимогам чинних стандартів

Для визначення придатності досліджуваних джерел світла для використання у системах загального освітлення житлових, громадських та робочих приміщень, отримані дані були зіставлені з базовими вимогами чинних державних і міжнародних нормативних документів (зокрема, з нормами щодо екодизайну та санітарними регламентами). Оцінка проводилася за трьома ключовими напрямками: відповідність заявленим енергетичним параметрам, рівень пульсації та якість кольоропередачі.

1. Відповідність заявленим енергетичним та світловим характеристикам.

Відповідно до загальноприйнятих стандартів якості, допустиме відхилення фактичного світлового потоку та споживаної потужності від номінальних значень, вказаних на маркуванні, не повинно перевищувати 10%.

Проведений аналіз засвідчує наявність суттєвих розбіжностей у значній частини зразків.

Найбільш показовим порушенням є результати вимірювання лампи №2 (ІЕК), фактичний світловий потік якої становить 875 лм при заявлених 1080 лм. Таке заниження є ознакою невідповідності продукції стандартам маркування.

2. Відповідність нормам пульсації освітлення.

Сучасні вимоги до безпеки освітлювальних приладів встановлюють жорсткі межі для показників мерехтіння: гранично допустиме значення короточасного флікера становить $PstLM \leq 1,0$, а показника стробоскопічного ефекту – $SVM \leq 0,4$.

Більшість досліджених ламп успішно вкладаються у ці нормативи, демонструючи стабільний світловий потік.

Разом з тим, виявлено групу приладів із критичними порушеннями. Лампи №10, №14 та №15 продемонстрували значення SVM на рівні 3,7667, 4,2673 та 4,2796 відповідно. Ці показники у багато разів перевищують максимально допустиму норму, що класифікує випромінювання цих ламп як небезпечне з точки зору виникнення стробоскопічного ефекту.

Окрім цього, лампа №9 ($PstLM = 5,5059$ та контрольний зразок ТВ4 ($PstLM = 1,1656$) не проходять перевірку за показником флікера.

3. Відповідність нормам кольоропередачі.

Для забезпечення належних умов зорової роботи та коректного сприйняття кольорів, чинні норми вимагають використання джерел світла із загальним індексом кольоропередачі $CRI \geq 80$.

Переважна більшість протестованих ламп (№1–№13, №16, №17) задовольняють цю вимогу, маючи індекс CRI в діапазоні 81,3–87,4.

Абсолютно не відповідають нормативам лампи №14 та №15, індекси CRI яких становлять 69,2 та 68,0 відповідно.

Наявність глибоких від'ємних значень спеціального індексу відтворення червоного кольору R9 у ламп №14 (-7,6) та №15 (-17,3) прямо суперечить вимогам щодо забезпечення зорового комфорту.

Для наочної систематизації отриманих результатів та визначення загальної придатності досліджуваних ламп до експлуатації складено зведену таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Зведені данні

Група / Номер лампи	Енергетичні та світлотехнічні параметри	Рівень пульсації (SVM, PstLM)	Якість кольоропереда чі (CRI, R9)	Загальний висновок щодо придатності
1	2	3	4	5
№1–8, №11– 13, №16, №17 (та більшість контрольних)	Присутні відхилення від заявлених потужності та потоків; $\cos \varphi$ переважно > 0.5	В межах норми ($SVM \leq 0,4$; $PstLM \leq 1,0$).	Відповідають нормам ($CRI > 80$, $R9 > 0$).	Придатні для використання у системах загального освітлення житлових і робочих приміщень.
№9	Дані від виробника відсутні, висока світловіддача 98,1 лм/Вт.	Не відповідає Критичний рівень флікера $PstLM = 5,50$.	Відмінна Найкращі показники у тесті $CRI = 87,4$; $R9 = 85,4$	Не придатна для тривалого освітлення. Попри чудовий спектр, викликати зорову втому через мерехтіння.
№10	Вкрай низький коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,33$).	Критичне перевищення Виразений стробоскопічни й ефект $SVM = 3,76$	Відповідає нормам $CRI = 82,5$; $R9 = 9,5$	Не придатна. Високий ризик негативного впливу на нервову систему через стробоскопічни й ефект.

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5
№14, №15	Найнижча енергоефективність 41,9 та 48,8 лм/Вт	Критичне перевищення Найвищий рівень стробоскопічного ефекту SVM > 4,26.	Критично низька Спотворений спектр CRI < 70, від'ємні значення R9	Абсолютно не придатні. Порушують усі базові норми безпеки та зорового комфорту.
ТВ4 (контрольний зразок)	Показники в межах норми.	Перевищення норми Підвищений рівень флікера PstLM = 1,16.	Відповідає нормам CRI = 82,8; R9 = 8,8.	Обмежено придатна. Не рекомендується для використання у місцях тривалого перебування людей.

В таблиці 3.7 підведені підсумки щодо використання досліджених ламп.

Таблиця 3.7 – Підсумки щодо використання ламп

№ лампи	Характеристика та висновок про придатність
1	Придатна. Тепле біле світло. Висока світловіддача (137.0 лм/Вт). Рівень пульсацій та перенесення кольорів повністю в межах норми.
2	Придатна. Дуже низькі пульсації, комфортний теплий спектр. Фактичний світловий потік занижений порівняно з заявленим (875 лм замість 1080 лм).
3	Придатна. Стабільне світло, мінімальний стробоскопічний ефект, оптимальні показники енергоефективності.
4	Придатна. Показники безпеки у нормі. Проте яскравість помітно нижча за маркування (387 лм замість 470 лм), середня енергоефективність.
5	Придатна. Параметри мерехтіння задовольняють вимоги санітарних норм. Світловий потік менший за номінальний.
6	Придатна. Стабільні характеристики, фактичні світлові та потужнісні показники відповідають заявленому маркуванню виробника.

Продовження таблиці 3.7

7	Придатна. Якісне нейтральне світло, підвищений індекс CRI та гарне відтворення червоного кольору ($R9=12.4$). Відсутній флікер.
8	Придатна. Фактичний світловий потік перевищує номінальний (714 лм замість 550 лм). Рівень пульсацій у нормі.
9	Не придатна. Попри зразковий спектр, лампа має критичний рівень низькочастотного флікера ($PstLM > 1.0$), що викликає зорову втому.
10	Не придатна. Вкрай низький коефіцієнт потужності та критичний рівень небезпечного стробоскопічного ефекту ($SVM > 0.4$).
11	Придатна. Гарна світловіддача, висока яскравість. Показники безпеки драйвера повністю відповідають нормативам.
12	Придатна. Збалансоване нейтральне світло, низькі рівні флікера та стабільна кольоропередача.
13	Придатна. Ефективне джерело нейтрального випромінювання. Драйвер надійно згладжує коливання світлового потоку.
14	Абсолютно не придатна. Низька ефективність, надмірно синє викривлене світло, незадовільний CRI (< 70), від'ємний індекс R9 та екстремальний стробоскопічний ефект.
15	Абсолютно не придатна. Порушує гігієнічні стандарти безпеки: критично високі пульсації світлового потоку та глибокий дефіцит червоної складової спектра.
16	Придатна. Холодне денне світло, висока світловіддача (114.5 лм/Вт). Стабільна робота драйвера, низькі пульсації.
17	Придатна. Абсолютний лідер за енергоефективністю (142.9 лм/Вт). Світловий потік стабільний, пульсації практично відсутні.
Ш1	Придатна. Холодне біле світло. Показники флікера та стробоскопічного ефекту мінімальні, якісна кольоропередача.
Ш2	Придатна. Холодне випромінювання з відмінно згладженим світловим потоком. Повністю безпечна.
Ш3	Придатна. Стабільне холодне біле світло без небезпечних пульсацій. Відповідає нормам.
Ш4	Придатна. Всі колориметричні та частотні характеристики відповідають гігієнічним вимогам.
Ш5	Придатна. Джерело світла холодного спектра з надійною фільтрацією мерехтіння.
P1	Придатна. М'яке затишне тепле світло, безпечний рівень стробоскопічного ефекту, оптимально для житлових кімнат.

Продовження таблиці 3.7

P2	Придатна. Тепле світло, пульсації в нормі. Невисокий рівень R9, але загальний індекс CRI задовольняє стандарт.
P3	Придатна. Тепле світло побутового призначення, всі параметри стабільності у межах норми.
P4	Придатна. М'яке біле світло з безпечним рівнем мерехтіння. Рекомендується для спалень та зон відпочинку.
P5	Придатна. Відмінна стабільність світлового потоку, тепла колірність випромінювання.
П1	Придатна. Нейтральний білий спектр з мінімальними пульсаціями. Ідеально підходить для кабінетів та робочих куточків.
П2	Придатна. Параметри мерехтіння значно нижчі за поріг небезпеки, CRI повністю задовольняє норму.
П3	Придатна. Стабільне нейтрально-біле джерело світла, пульсації та передача кольорів без зауважень.
ТВ1	Придатна. М'яке затишне світло теплого тону. Безпечне для очей при тривалій експлуатації в побуті.
ТВ2	Придатна. Виразний теплий спектр із хорошими показниками CRI та якісним згладжуванням пульсацій.
ТВ3	Придатна. Забезпечує стабільний та комфортний для сприйняття світловий потік у житлових зонах.
ТВ4	Обмежено придатна. Стробоскопічний ефект відсутній (SVM в нормі), проте рівень флікера перевищує безпечну межу ($PstLM > 1.0$). Не рекомендується для приміщень із тривалим перебуванням людей.

3.6 Вплив на людину

Штучне освітлення відіграє ключову роль у формуванні мікроклімату приміщень і має не лише утилітарне значення, але й безпосередньо впливає на біологічні ритми, психоемоційний стан, працездатність та загальне самопочуття людини. Результати проведених досліджень дозволяють чітко простежити кореляцію між невідповідними технічними характеристиками окремих світлодіодних ламп та їхнім потенційним негативним впливом на організм.

Вплив пульсації світлового потоку. Найбільш виражений негативний фізіологічний вплив чинить невидиме оком мерехтіння світла. Як показали результати вимірювань, лампи №10, №14 та №15 мають критично високі показники стробоскопічного ефекту (SVM), а лампа №9 – небезпечний рівень низькочастотного флікера (PstLM).

- Тривале перебування у приміщенні з таким освітленням змушує зіницю та зоровий нерв постійно адаптуватися до мікроколивань яскравості. Це призводить до швидкого перенапруження зорового аналізатора, різі в очах, зниження концентрації уваги та загальної втоми.
- У людей з підвищеною чутливістю тривалий вплив такого мерехтіння є тригером для виникнення головного болю, мігрені та підвищення рівня стресу.
- Крім того, високий стробоскопічний ефект (як у зразків №14 та №15) становить серйозну небезпеку в майстернях або на виробництві, оскільки може створювати оптичну ілюзію нерухомості інструментів чи деталей, що обертаються, підвищуючи ризик травматизму.

Вплив спектрального складу та колірної температури. Аномально висока колірна температура, зафіксована у ламп №14 (7490 K) та №15 (7262 K), вказує на наявність вираженого «синього піку» у спектрі випромінювання. Відповідно до сучасних медичних та хронобіологічних досліджень, надлишок короткохвильового синього світла у вечірній час доби пригнічує секрецію мелатоніну – головного гормону, що регулює сон. Використання таких ламп у спальнях чи житлових кімнатах неминуче призводитиме до порушення циркадних (добових) ритмів, проблем із засинанням, безсоння та хронічного недосипання.

Вплив якості кольоропередачі. Не менш важливим фактором візуального комфорту є якість відтворення кольорів. Використання ламп із вкрай низькими індексами кольоропередачі ($CRI < 70$ у зразків №14 та №15) та глибоким дефіцитом червоного спектра (від'ємні значення індексу R9) спричиняє сильне спотворення кольорів навколишнього середовища.

- Під таким освітленням шкіра людини виглядає блідою, неприродною або синюватою, а предмети інтер'єру та їжа втрачають свою привабливість.
- Неприродне, «мертве» освітлення підсвідомо викликає у людини психологічний дискомфорт, відчуття тривоги та сприяє погіршенню настрою. Натомість лампи з високим CRI (понад 80) та позитивним R9, до яких належить більшість досліджених якісних зразків (наприклад, №7, серія Р, серія Ш), створюють затишну атмосферу, що сприяє розслабленню та збереженню психологічної рівноваги.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено комплексне дослідження світлотехнічних, електротехнічних та колориметричних характеристик 17 зразків побутових світлодіодних ламп від різних виробників, а також додаткових контрольних підгруп. Аналіз отриманих результатів показав наявність суттєвих відхилень фактичних параметрів від номінальних у більшості зразків. Значна частина ламп споживає менше електроенергії, ніж вказано на пакуванні, а також фіксуються як суттєве заниження, так і завищення світлового потоку. Світловіддача досліджених зразків також суттєво варіюється: від вкрай низьких 41,9 лм/Вт до високих 142,9 лм/Вт. Крім того, виявлено проблеми з якістю драйверів живлення, зокрема фіксувався критично низький коефіцієнт потужності в окремих зразках.

Оцінка стабільності світлового потоку показала, що хоча більшість ламп успішно вкладаються у нормативи щодо пульсацій, існують зразки з критичними порушеннями. Зокрема, зафіксовано аномально високі значення стробоскопічного ефекту та небезпечний рівень низькочастотного флікера. Тривале перебування у приміщеннях з таким освітленням призводить до перенапруження зорового аналізатора, загальної втоми, а у чутливих людей може викликати головний біль та підвищення рівня стресу.

Дослідження спектрального складу та передачі кольору виявило, що переважна більшість протестованих ламп задовольняє базові вимоги до індексу кольоропередачі. Проте деякі зразки абсолютно не відповідають нормативам, демонструючи індекс CRI менше 70 та глибокі від'ємні значення індексу R9, що свідчить про гострий дефіцит червоного випромінювання. Такі лампи характеризуються надмірним синім піком у спектрі через аномально високу колірну температуру. Використання такого освітлення спричиняє сильне спотворення кольорів навколишнього середовища, викликає психологічний дискомфорт та пригнічує секрецію мелатоніну, що веде до порушення добових ритмів та проблем із засинанням.

Підсумовуючи, можна констатувати, що переважна більшість досліджених ламп є придатною для використання у системах загального освітлення житлових і робочих приміщень. Однак експлуатація окремих зразків (зокрема ламп №9, №10, №14 та №15) є недопустимою. Вони порушують базові норми безпеки та зорового комфорту, створюючи пряму загрозу для самопочуття та здоров'я людини під час тривалого використання.

На рисунках 3.7–3.10 зображені лампи №9, №10, №14 та №15.



Рисунок 3.7 – Лампа №9



Рисунок 3.8 – Лампа №10

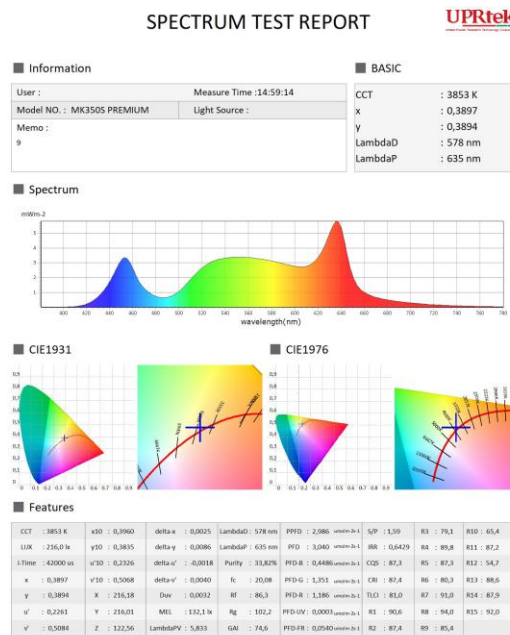


Рисунок 3.9 – Лампа №14

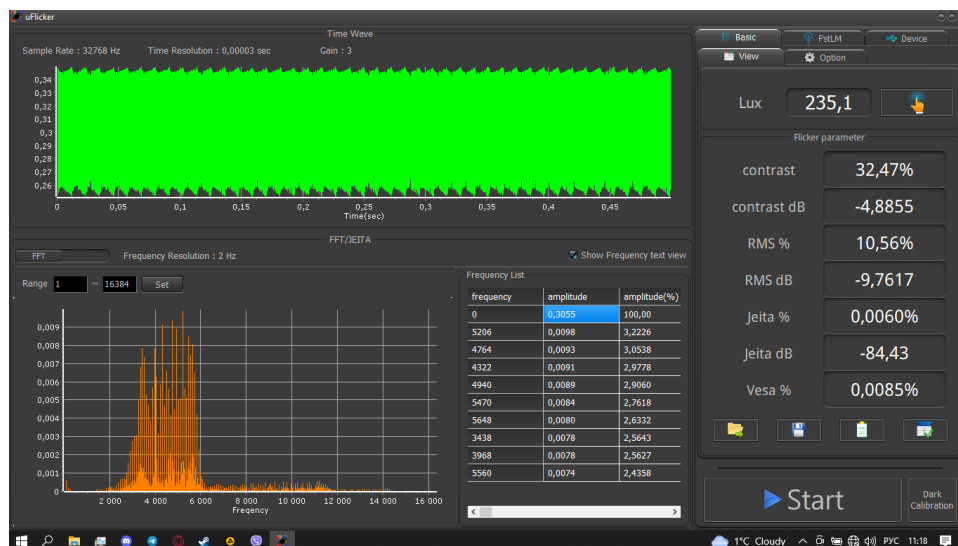


Рисунок 3.10 – Лампа №15

На рисунках 3.12 – 3.15 зображено спектральні характеристики та пульсації цих ламп.



a)



b)

Рисунок 3.11 – Характеристики до лампи 9:

а) Спектральні характеристики, б) Пульсації

SPECTRUM TEST REPORT



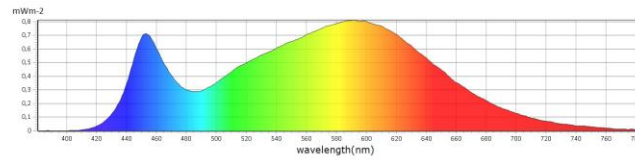
Information

User :	Measure Time :15:06:08
Model NO. : MK350S PREMIUM	Light Source :
Memo :	
10	

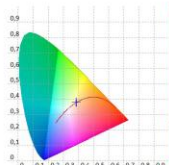
BASIC

CCT	: 3941 K
x	: 0,3836
y	: 0,3804
LambdaD	: 579 nm
LambdaP	: 591 nm

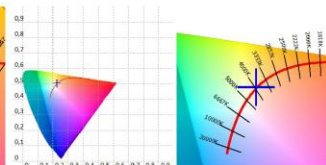
Spectrum



CIE1931



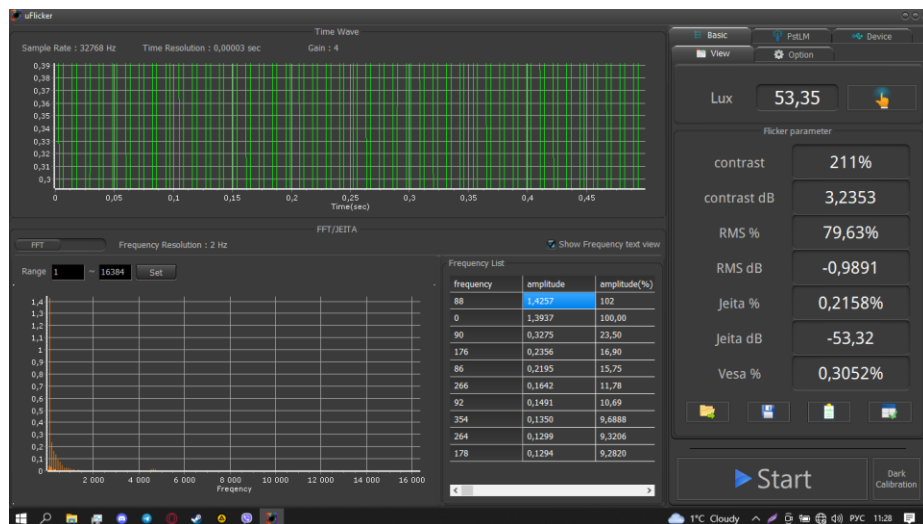
CIE1976



Features

CCT : 3941 K	x10 : 0,3899	delta-x : 0,0005	LambdaD : 579 nm	PFFD : 0,6544 umolm-2s-1	S/P : 1,67	R3 : 95,4	R10 : 74,7
LUX : 46,74 lx	y10 : 0,3774	delta-y : 0,0020	LambdaP : 591 nm	PFD : 0,6775 umolm-2s-1	IRR : 0,1433	R4 : 79,8	R11 : 77,2
I-Time : 240000 us	u'10 : 0,2311	delta-u' : -0,0004	Purity : 29,27%	PFD-B : 0,1163 umolm-2s-1	CQS : 82,2	R5 : 80,6	R12 : 63,1
x : 0,3836	v'10 : 0,5033	delta-v' : 0,0009	fc : 4,344	PFD-G : 0,2988 umolm-2s-1	CRI : 82,5	R6 : 84,7	R13 : 82,6
y : 0,3804	X : 47,14	Duv : 0,0008	Rf : 83,8	PFD-R : 0,2394 umolm-2s-1	TLCI : 68,2	R7 : 85,6	R14 : 98,2
u' : 0,2258	Y : 46,74	MEL : 31,72 lx	Rg : 94,3	PFD-UV : 0,0000 umolm-2s-1	R1 : 80,7	R8 : 64,2	R15 : 74,6
v' : 0,5036	Z : 29,00	LambdaPV : 0,8125	GAI : 70,4	PFD-FR : 0,0230 umolm-2s-1	R2 : 89,4	R9 : 9,5	

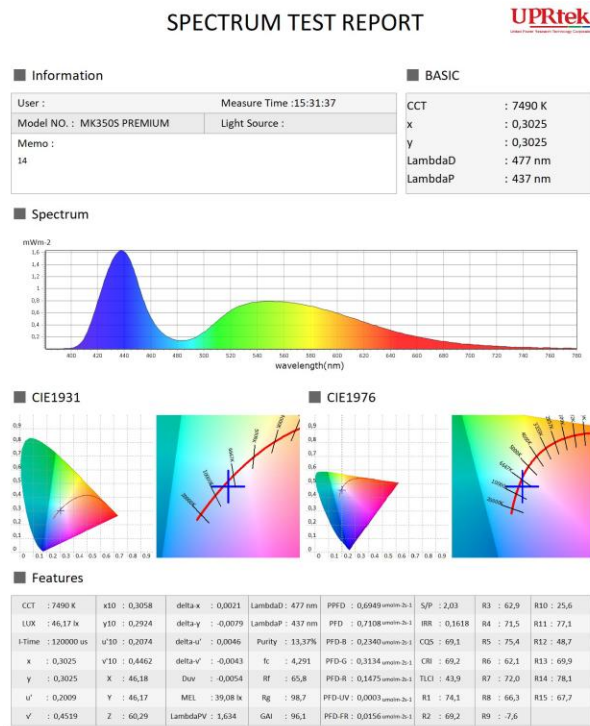
a)



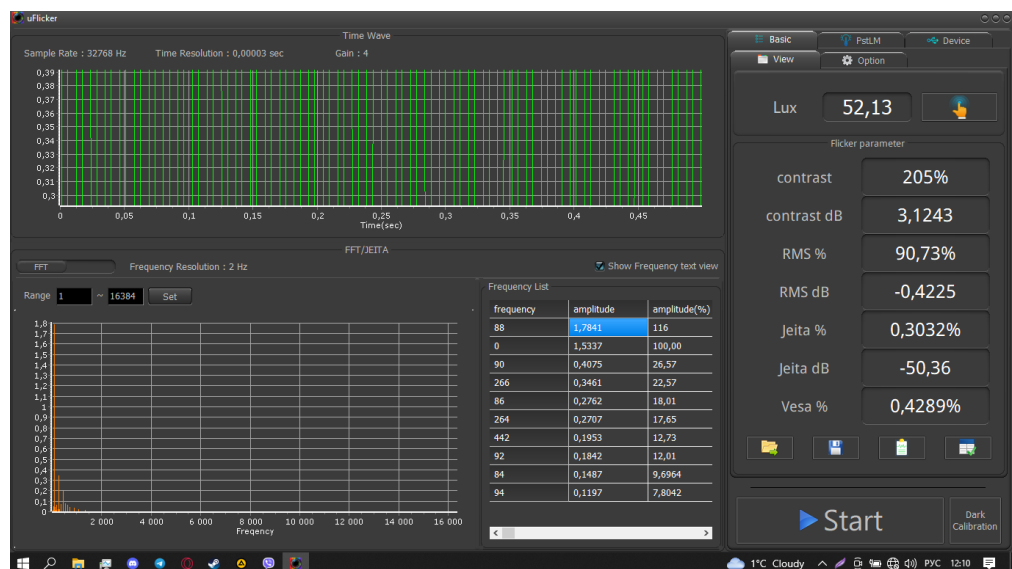
б)

Рисунок 3.12 – Характеристики до лампи 10:

а) Спектральні характеристики, б) Пульсації



a)



б)

Рисунок 3.13 – Характеристики до лампи 14:

а) Спектральні характеристики, б) Пульсації

SPECTRUM TEST REPORT

UPRtek
Light Power Research Technology Equipment

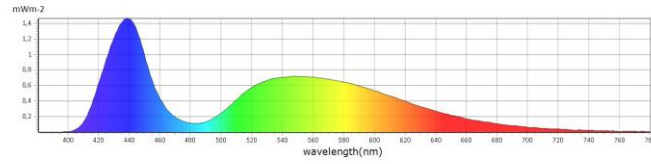
Information

User :	Measure Time :15:39:22
Model NO. : MK350S PREMIUM	Light Source :
Memo :	
15	

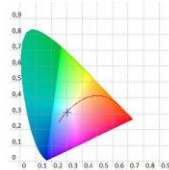
BASIC

CCT	: 7262 K
x	: 0,3044
y	: 0,3076
LambdaD	: 479 nm
LambdaP	: 438 nm

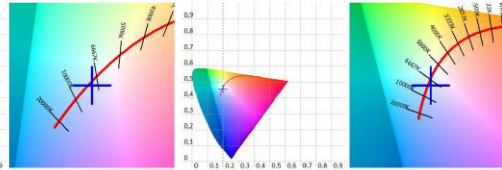
Spectrum



CIE1931



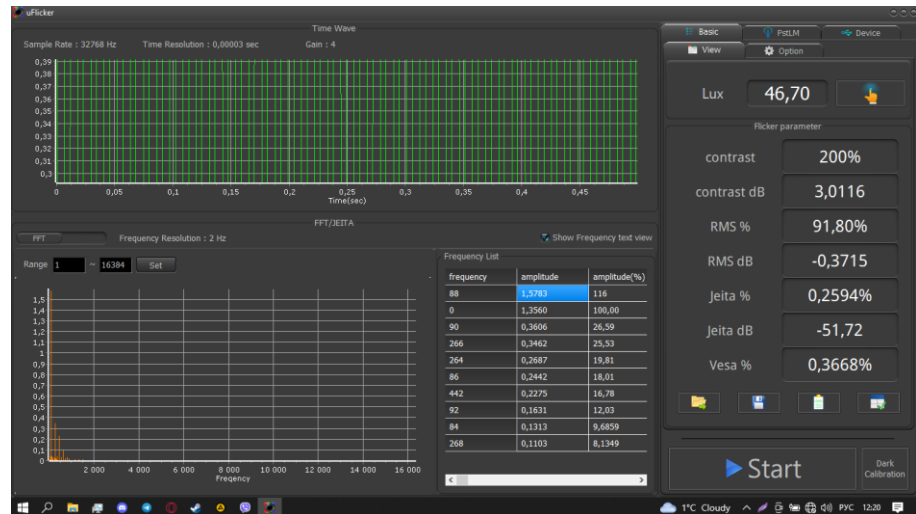
CIE1976



Features

CCT : 7262 K	x10 : 0,3082	delta-x : 0,0013	LambdaD : 479 nm	PPFD : 0,6133 umol/m²/s	S/P : 2,00	R3 : 63,5	R10 : 24,0
LUX : 41,62 lx	y10 : 0,2972	delta-y : -0,0056	LambdaP : 438 nm	PFD : 0,6259 umol/m²/s	IRR : 0,1422	R4 : 70,4	R11 : 75,2
tTime : 140000 us	u'10 : 0,2072	delta-u' : 0,0031	Purity : 12,17%	PFD-B : 0,2004 umol/m²/s	CQS : 68,5	R5 : 73,4	R12 : 46,5
x : 0,3044	y'10 : 0,4495	delta-v' : -0,0031	fc : 3,868	PFD-G : 0,2836 umol/m²/s	CRI : 68,0	R6 : 61,0	R13 : 68,1
y : 0,3076	X : 41,20	Duv : -0,0037	Rf : 65,3	PFD-R : 0,1293 umol/m²/s	TLCI : 42,1	R7 : 71,7	R14 : 78,5
u' : 0,2002	Y : 41,62	MEL : 34,38 k	Rg : 97,8	PFD-UV : 0,0001 umol/m²/s	R1 : 71,9	R8 : 63,8	R15 : 64,8
v' : 0,4551	Z : 52,52	LambdaPV : 1,464	GAI : 93,9	PFD-FR : 0,0225 umol/m²/s	R2 : 68,3	R9 : -17,3	

a)



б)

Рисунок 3.14 – Характеристики до лампи 15:

а) Спектральні характеристики, б) Пульсації

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання в області охорони праці

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якого науково-дослідного та дослідницького процесу. Головною метою цього розділу в межах бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка комплексу організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності дослідника під час проведення лабораторних досліджень із вимірювання світлотехнічних і колориметричних характеристик джерел світла.

Специфіка виконання даної роботи полягає у взаємодії з електротехнічним обладнанням (спектрометр, еталонне джерело живлення, гоніофотометр), тривалій роботі в умовах абсолютної темряви, а також у прямому візуальному контакті з об'єктами дослідження, які можуть генерувати небезпечні рівні пульсацій (стробоскопічний ефект) та мати агресивний спектральний склад (небезпека синього світла) [19].

Відповідно до зазначеної специфіки та вимог чинного законодавства України, основними завданнями в області охорони праці для цього дипломного проєкту є:

1. Аналітично-дослідницькі завдання:

- Проведення детального аналізу умов праці на обраному робочому місці (у лабораторному приміщенні) та виявлення небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

- Класифікація виявлених негативних факторів (фізичних, психофізіологічних тощо) під час роботи з вимірювальними комплексами згідно з чинними державними стандартами, зокрема ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007.

2. Забезпечення охорони праці, електро- та пожежної безпеки:

- Розробка необхідних організаційних і технічних заходів з охорони праці, які забезпечують безпеку і нешкідливі умови праці.

- Розробка заходів, що забезпечують електробезпеку під час підключення лабораторних блоків живлення та роботи з фотометричною установкою, з урахуванням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ДНАОП 0.00–1.21–98).

- Забезпечення належних заходів пожежної безпеки у приміщенні з електронною апаратурою згідно з НАПБ А.01.001–2014.

3. Санітарно-гігієнічні завдання та захист зору дослідника:

- Розробка рекомендацій щодо мінімізації шкідливого впливу на зоровий апарат дослідника. Це включає захист від інтенсивного прямого світла, сліпучої дії, а також від невидимого високочастотного флікера під час налаштування тестового стенду.

- Організація безпечного режиму праці та відпочинку при тривалій роботі в затемненому приміщенні для запобігання перенапруженню центральної нервової системи та виникненню зорової втоми (астенопії).

4. Організаційні та профілактичні заходи:

- Визначення вимог до ергономіки робочого простору (зокрема, при роботі за персональним комп'ютером під час статистичної обробки отриманих масивів даних).

- Розробка алгоритму дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій на робочому місці.

- Наведення основних принципів надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом.

4.2 Безпека під час проведення дослідження

Безпосередніми об'єктами дослідження в даній роботі є 17 зразків світлодіодних ламп побутового призначення від різних виробників (IEK, Teco, NANOTEX, Lightmaster, ELM, MAXUS, economka та 1G1N) з різними експлуатаційними характеристиками. Відповідно, досліджується фізичне

світлове середовище, створене цими побутовими лампами, та їхній безпосередній вплив на показники зорового комфорту людини.

З точки зору охорони праці, проектним об'єктом для розробки заходів безпеки виступає безпосередньо робоче місце дослідника – спеціально обладнана лабораторна дільниця. Усі дослідні вимірювання характеристик побутових ламп проводяться в умовах абсолютної темної кімнати. Забезпечення повної темряви є суворою вимогою методики досліджу, що дозволяє виключити вплив паразитного фонового освітлення на чутливу матрицю вимірювального приладу [20].

Дослідна дільниця оснащена спеціалізованим вимірювальним та електротехнічним обладнанням, до якого належать:

- Портативний високоточний спектрометр еталонного класу UPRtek MK350S Premium.
- Гоніофотометр GO-2000, що використовується для дослідження характеристик джерела світла у відкритому просторі.
- Фотометрична куля діаметром 1 метр, модернізована за допомогою спеціально спроектованого та виготовленого на 3D-принтері перехідника-адаптера для жорсткого та щільного приєднання приймального датчика спектрофотометра.
- Еталонний лабораторний блок живлення для подачі стабілізованої напруги на дослідні зразки ламп.

Робоча дільниця також включає зону для комп'ютерної обробки результатів, що вимагає дотримання ергономічних вимог при роботі з персональним комп'ютером та спеціалізованим програмним забезпеченням (uSPECTRUM, uFlicker).

Головною небезпечною особливістю цього проектного об'єкта є поєднання робіт у повній темряві із взаємодією з увімкненим електрообладнанням і лампами під стандартною напругою 230 В. Це формує специфічний комплекс вимог до дотримання правил електробезпеки,

пожежної безпеки та правильної організації робочого простору для запобігання травматизму.

Під час проведення досліджень характеристик світлодіодних ламп на спеціально обладнаному робочому місці виконується чітко регламентований та послідовний комплекс робіт, який вимагає безперервної взаємодії дослідника з високоточним вимірювальним, механічним та електротехнічним обладнанням. Робочий процес розпочинається з обов'язкового підготовчого етапу, що включає ретельний візуальний огляд цілісності рухомих частин гоніофотометра GO-2000 та перевірку стану портативного спектрометра UPRtek MK350S Premium перед початком будь-яких маніпуляцій. На цьому етапі здійснюється підключення контролера гоніометра до однофазного джерела живлення з напругою 220 В, при цьому, для безаварійної роботи та гарантування безпеки персоналу, вивід заземлення приладу в обов'язковому порядку підключається до загального контуру заземлення лабораторії. Паралельно проводиться підготовка спектрометра: встановлюється літієва акумуляторна батарея та накопичувач даних (SD-карта).

Згідно з вимогами безпечної експлуатації, досліднику категорично забороняється розбирати акумуляторний блок, піддавати прилад впливу підвищеної вологості або накривати його будь-якими матеріалами під час процесу заряджання, оскільки це може призвести до критичного перегріву, виникнення пожежі або ураження електричним струмом [21].

Наступним, найбільш відповідальним з точки зору механічної та електричної безпеки етапом, є монтаж і просторове юстирування об'єкта дослідження. Обрана для тестування побутова світлодіодна лампа обережно встановлюється у трикулачковий затискний патрон гоніометра і максимально надійно фіксується за допомогою спеціальної затискної рукоятки, що гарантує унеможливлення її випадіння під час автоматичного обертання установки навколо своїх осей. За допомогою вбудованого лазерного покажчика та маховика ручного управління виконується точне просторове центрування

фотометричного центру лампи відносно головного центру обертання гоніометра, що є критично важливим для отримання достовірних результатів вимірювань у відкритому просторі. У випадку використання фотометричної кулі лампа розміщується всередині сфери, а датчик спектрометра жорстко кріпиться у вимірювальному вікні за допомогою розробленого перехідника-адаптера. Після надійної механічної фіксації кабель живлення лампи підключається до відповідних клем еталонного лабораторного джерела живлення. При цьому дослідник повинен суворо контролювати електричні параметри: з міркувань пожежо- та електробезпеки максимальний струм у кожному робочому ланцюзі не повинен перевищувати 10 А, а напруга обмежується значенням 380 В. Для виходу кристалів світлодіодів та драйвера на номінальний тепловий режим лампа витримується увімкненою протягом 30 хвилин.

Безпосереднє проведення фотометричних, спектральних та колориметричних вимірювань відбувається у суворо контрольованих умовах абсолютно темної кімнати, куди повністю перекрито доступ зовнішнього світла. Перед початком фіксації показників дослідник зобов'язаний виконати процедуру темного калібрування (Dark Calibration) спектрометра, яка проводиться із щільно закритою кришкою оптичного сенсора і дозволяє програмно усунути апаратні теплові шуми матриці, що впливають на точність обчислення пульсацій. Управління самим процесом сканування та тестування здійснюється дистанційно з робочого місця оператора за допомогою спеціалізованого прикладного програмного забезпечення GOSoft (для керування приводами гоніофотометра) та uSPECTRUM (для зчитування спектральних даних). Оскільки гоніометр у процесі сканування здійснює автоматичне обертання досить масивних металевих деталей та самої лампи по осях С та γ , дослідник повинен постійно перебувати на безпечній відстані від рухомих частин механізму, щоб уникнути випадкового механічного травмування. У разі виникнення будь-якої позаштатної ситуації, заклинювання механізму або іскріння контактів, оператор зобов'язаний негайно натиснути

червону кнопку екстреної зупинки на панелі контролера, що миттєво знеструмлює приводи та апаратно блокує роботу установки.

На завершальному етапі дослідних робіт отримані масиви цифрових даних, що містять значення загальної освітленості, колірної температури, індексів CRI та R9, а також показників мерехтіння SVM і PstLM, експортуються у форматах електронних таблиць або графічних звітів на зовнішній носій чи безпосередньо передаються на персональний комп'ютер для подальшого наукового аналізу. Завершення робіт на лабораторній дільниці передбачає сувору послідовність дій для безпечного виведення обладнання з експлуатації. Спочатку відключається живлення досліджуваної світлодіодної лампи, після чого виконується програмне скидання налаштувань гоніометра, що плавно повертає його рухомі частини у вихідне положення. Наприкінці дослідник здійснює послідовне знеструмлення джерела живлення контролера, самого гоніометра, еталонного лабораторного блока живлення та всіх допоміжних вимірювальних приладів. Всі ці маніпуляції виконуються із суворим дотриманням затверджених інструкцій з експлуатації заводу–виробника та загальних правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, що гарантує збереження високоточних приладів та повну безпеку персоналу лабораторії.

4.3 Аналіз умов праці, виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів на об'єкті проектування

Під час проведення досліджень характеристик світлодіодних ламп проектним об'єктом для розробки заходів безпеки виступає робоче місце дослідника – спеціально обладнана лабораторна дільниця. Специфіка виконання роботи полягає у проведенні фотометричних, спектральних та колориметричних вимірювань у суворо контрольованих умовах абсолютно темної кімнати. Дослідна дільниця оснащена спеціалізованим високоточним вимірювальним обладнанням (спектрометр UPRtek MK350S Premium),

механічними установками (гоніофотометр GO-2000, фотометрична куля) та електротехнічними приладами, зокрема еталонними лабораторними блоками живлення. Робочий процес також включає зону для комп'ютерної обробки отриманих масивів даних. На основі детального вивчення виробничого процесу та згідно з класифікацією ДСТУ 12.0.003-74*, на робочому місці дослідника виявлено низку фізичних та психофізіологічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Першим вагомим фактором є підвищена напруга в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини. Обґрунтуванням його появи є те, що робота передбачає підключення контролера гоніометра до однофазного джерела живлення з напругою 220 В. Крім того, на еталонному лабораторному джерелі живлення, до якого безпосередньо підключаються досліджувані лампи, напруга може сягати 380 В при максимальному робочому струмі до 10 А. Це створює пряму загрозу ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції або недотримання правил безпеки під час монтажу та підключення обладнання.

Наступним фактором виступають рухомі незахищені елементи механізмів, машин і виробничого обладнання. Його наявність зумовлена тим, що у процесі просторового сканування гоніометр здійснює автоматичне обертання досить масивних металевих деталей та безпосередньо самої досліджуваної лампи по осях С та γ . Необережне наближення дослідника до установки під час її роботи може призвести до механічного травмування або заклинювання рухомого механізму [19, 20].

Також на робочому місці присутні такі фактори, як відсутність чи нестача природного світла та недостатня освітленість робочої зони. Відповідно до суворих вимог методики дослідів, усі спектральні та фотометричні вимірювання проводяться в умовах абсолютної темряви для уникнення впливу паразитного фонового освітлення на чутливу матрицю вимірювального приладу. Ця обставина створює ризик травматизму при

переміщенні лабораторією та значно ускладнює візуальний контроль за загальним станом обладнання.

Ще однією специфічною групою фізичних небезпек є підвищена пульсація світлового потоку та пряма блискість. У процесі роботи дослідник має безпосередній візуальний контакт з об'єктами дослідження – різноманітними побутовими світлодіодними лампами, які під час тестування можуть генерувати небезпечні рівні пульсацій, викликати виражений стробоскопічний ефект та мати агресивний спектральний склад з інтенсивним «синім піком». Це може призводити до інтенсивної сліпучої дії під час просторового юстирування та центрування увімкненої лампи на вимірювальному стенді.

Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Серед психофізіологічних факторів головну роль відіграють нервово–психічні перевантаження, зокрема перенапруження зорових аналізаторів та загальне розумове перенапруження. Їх виникнення повністю обґрунтовується тривалою роботою в затемненому лабораторному приміщенні, що вимагає постійної та виснажливої адаптації зорового апарату. Додатково, необхідність тривалої концентрації уваги під час візуального контролю за показниками мерехтіння світла та високе розумове напруження при подальшій комп'ютерній обробці отриманих статистичних масивів даних створюють значне навантаження на центральну нервову систему. У комплексі це може викликати швидкий розвиток зорової втоми (астенопії) та зниження загальної працездатності.

Зафіксовані рівні виявлених небезпечних і шкідливих факторів вимагають суворого дотримання дисципліни та впровадження комплексного підходу до охорони праці. Необхідна розробка відповідних організаційних, технічних і санітарно–гігієнічних заходів захисту, що гарантуватимуть безпечні та нешкідливі умови праці для дослідника на всіх етапах виконання дослідів.

4.4 Розробка організаційних заходів з охорони праці

Організація безпечних і нешкідливих умов праці під час проведення лабораторних досліджень світлодіодних джерел світла потребує впровадження чіткої системи організаційних заходів. Першочерговим напрямком у цьому комплексі є забезпечення працюючих необхідними знаннями з охорони праці безпосередньо на конкретному робочому місці. Відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, дослідник та лабораторний персонал повинні пройти обов'язкові інструктажі, що включають вступний, первинний на робочому місці, а також повторні інструктажі. Специфіка цих інструктажів на ділянці полягає у детальному вивченні інструкцій з безпечної експлуатації прецизійного портативного спектрометра UPRtek MK350S Premium та автоматизованого гоніофотометра GO-2000. Допуск до самостійного виконання робіт надається лише після успішної перевірки знань та практичних навичок безпечного поводження з вимірювальними комплексами та лабораторними блоками живлення.

Правильна організація безпечного і нешкідливого виконання робіт є критично важливою, оскільки випробування проводяться в електричних установках та в умовах специфічного світлового середовища. Робочий процес регламентується за допомогою затвердженого графіка вимірювань та інструкцій, які визначають чітку послідовність дій від моменту підготовки приміщення до повного знеструмлення апаратури. З огляду на необхідність перебування в абсолютно темній кімнаті для усунення паразитного фонового освітлення, організаційні заходи передбачають обмеження самостійного перебування персоналу без можливості екстреного зв'язку або контролю з боку відповідальної особи. Управління гоніофотометричною установою та зчитування даних здійснюється дистанційно з робочого місця оператора через спеціалізоване прикладне програмне забезпечення GOSoft та uSPECTRUM. Це дозволяє оператору перебувати на безпечній відстані від рухомих механізмів

під час автоматичного обертання елементів установки навколо осей. Крім того, організаційно встановлюється суворий режим праці та відпочинку із регулярними перервами, що необхідно для відновлення зорових аналізаторів після тривалої адаптації до темряви та впливу пульсацій світлового потоку досліджуваних ламп.

Для виконання робіт на даній дослідній ділянці встановлюються суворі кваліфікаційні вимоги до персоналу. Дослідник та особи, які залучаються до обслуговування вимірювальних фотометричних комплексів, повинні мати відповідну вищу або спеціальну технічну освіту в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Оскільки живлення лабораторних приладів та досліджуваних ламп здійснюється під напругою 220 В та 380 В, персонал зобов'язаний пройти атестацію та мати групу з електробезпеки не нижче III відповідно до вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ДНАОП 0.00–1.21–98). Наявність цієї групи підтверджує, що працівник чітко усвідомлює небезпеку електричного струму, знає схему живлення установки, правила експлуатації захисних засобів та володіє практичними навичками надання першої долікарської допомоги потерпілим при нещасних випадках [20].

Важливою складовою візуального контролю безпеки на об'єкті проектування є перелік і правильне використання необхідних попереджувальних та забороняючих написів, плакатів і знаків. На входних дверях до лабораторного приміщення абсолютної темряви встановлюється забороняючий знак з написом про заборону входу стороннім особам та інформаційне табло, яке сигналізує про тривання процесу вимірювань, що запобігає раптовому потраплянню зовнішнього світла та травмуванню людей у темряві. Безпосередньо на корпусах лабораторних блоків живлення, гоніофотометра та розподільних щитків розміщуються попереджувальні знаки електричної небезпеки з написом «Обережно! Електрична напруга!». Під час проведення монтажу, просторового юстирування або заміни досліджуваних ламп у трикулачковому патроні, на комутаційних апаратах обов'язково

вивіщується забороняючий плакат «Не вмикати! Робота на лінії!». Зони навколо рухомих частин гоніофотометра GO-2000 маркуються спеціальними попереджувальними написами або жовто-чорними сигнальними смугами для обмеження перебування людей у радіусі обертання масивних елементів механізму під час сканування.

Необхідність застосування пропонованих організаційних заходів при виконанні робіт на даному об'єкті проектування викликана та обґрунтована його специфічними і небезпечними умовами виробничого середовища. Поєднання роботи у повній темряві із наявністю відкритого електрообладнання під напругою до 380 В створює унікальні ризики, за яких дослідник позбавлений можливості візуально вчасно помітити пошкодження ізоляції або іскріння контактів. Автоматичне обертання елементів гоніофотометра за відсутності належного організаційного контролю відстані та знаходження оператора поруч із установкою може призвести до важкого механічного травмування. Крім того, дослідницька робота з окремими бюджетними світлодіодними джерелами світла, що мають незадовільні показники кольоропередачі та критичні рівні низькочастотного флікера і стробоскопічного ефекту, спричиняє інтенсивне перенапруження нервової системи та астенію. Впровадження суворих вимог до кваліфікації, проведення регулярного навчання, чіткий поділ режимів праці, а також наочне використання попереджувальних плакатів дозволяють повністю нівелювати людський фактор, мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій та гарантувати повну фотобіологічну й експлуатаційну безпеку під час дослідів.

4.5 Розрахунок занулення

Розрахунок занулення (перевірка опору петлі «фаза-нуль» для систем TN-C-S або TN-S) для освітлювальної мережі зводиться до того, щоб гарантувати: у разі пробією фази на металевий корпус світильника струм

короткого замикання буде достатнім для миттєвого спрацювання автоматичного вимикача.

Для навантаження 150 Вт цей розрахунок є з запасом для надійності спрацювання.

Визначення робочого струму навантаження

Навантаження складає $P = 150$ Вт. Робоча напруга $U = 230$ В.

При використанні сучасних світлодіодних джерел світла – де драйвери проектуються для забезпечення високих показників CRI, TM-30 та мінімізації індексів мерехтіння на кшталт PstLM чи SVM – коефіцієнт потужності $\cos \varphi \approx 0,5$ може варіюватися від 0,5 до 0,95 залежно від топології схеми.

Візьмемо для розрахунку найгірший варіант (дешевий драйвер без активного коректора), $\cos \varphi \approx 0,5$:

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \quad (4.1)$$

$$I = \frac{150}{230 \cdot 0.5} = 1,3 \text{ А}$$

Якщо $\cos \varphi \approx 0,95$ (якісний драйвер), струм складе лише близько 0,69 А.

Вибір захисного апарату та перерізу кабелю.

Згідно з ПУЕ, для стаціонарних освітлювальних мереж мінімально допустимий переріз мідного кабелю становить $1,5 \text{ мм}^2$.

Лінія освітлення зазвичай захищається автоматичним вимикачем номіналом 10 А.

Для освітлення з електронними компонентами найкраще підходить автомат з характеристикою відключення В (спрацює при струмах короткого замикання 3/5 разів вищих за номінал), щоб уникнути помилкових

спрацьовувань від пускових струмів (inrush current) конденсаторів, але при цьому гарантувати швидкий захист.

Розрахунок струму короткого замикання та опору петлі «фаза–нуль».

Щоб автомат номіналом 10 А (характеристика В) гарантовано відключив живлення за нормативні 0,4 секунди, струм однофазного короткого замикання (I_{sc}) має бути не меншим за:

$$I_{sc} \geq I_n \cdot 5 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ А}$$

Якщо використовується автомат з характеристикою С, струм КЗ має бути не менше 100 А.

Максимально допустимий повний опір петлі «фаза–нуль» (Z_s) розраховується за формулою:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_{sc}} \quad (4.2)$$

Де $U_0 = 230 \text{ В}$ – фазна напруга.

$$Z_s \leq \frac{230}{50} = 4,6 \text{ Ом}$$

Перевірка реального опору лінії.

Опір одного кілометра мідної жили перерізом $1,5 \text{ мм}^2$ становить приблизно 12,1 Ом.

Петля складається з фазного (L) та захисного (PE) провідників.

Якщо довжина кабелю від щитка до світильника становить, наприклад, 20 метрів, загальна довжина петлі – 40 метрів (0,04 км).

$$R_{line} = 0,04 \cdot 12,1 = 0,48 \text{ Ом}$$

Оскільки 0,48 Ом значно менше допустимих 4,6 Ом вибраний автомат відключить лінію миттєво і надійно.

Класичне «занулення» (з'єднання корпусу приладу з робочим нулем N безпосередньо в кімнаті або розетці) у сучасних двопровідних мережах категорично заборонено. Це створює смертельну небезпеку обриву нуля, коли фаза через навантаження піде на корпус.

Правильна реалізація – це прокладання трижильного кабелю (ВВГнг-LS 3х1,5), де третя жила (РЕ) є окремим захисним провідником, який з'єднується з нульовою шиною (PEN) тільки у вступному щиті з обов'язковим повторним заземленням (перехід на систему TN-C-S).

4.6 Долікарська допомога потерпілим при нещасних випадках

Своєчасне та правильне надання долікарської допомоги потерпілим при нещасних випадках є вирішальним чинником для збереження життя, запобігання розвитку важких ускладнень та мінімізації наслідків травмувань у процесі виконання досліджень. Специфіка лабораторної ділянки з вимірювання світлотехнічних та колориметричних характеристик світлодіодних ламп пов'язана з експлуатацією електротехнічного обладнання під напругою до 380 В в умовах абсолютної темряви, що обумовлює першочергову необхідність чіткого знання персоналом алгоритмів допомоги при ураженні електричним струмом, термічних опіках та механічних пошкодженнях рухомими частинами гоніофотометра. Кожен працівник лабораторії повинен володіти практичними навичками само- та взаємодопомоги, оскільки в критичній ситуації фактор часу є визначальним для порятунку людини.

Найбільш небезпечним нещасним випадком на даній дослідній ділянці є ураження людини електричним струмом, що може виникнути внаслідок аварійного пробою ізоляції або випадкового дотику до відкритих струмоведучих частин лабораторних блоків живлення чи клем підключення.

Першочерговою і невідкладною дією при цьому є негайне звільнення потерпілого від дії електричного струму. Оскільки вимірювальний процес відбувається у темряві, дослідник повинен діяти оперативно та чітко насамперед через повне знеструмлення установки шляхом натискання червоної кнопки екстреної зупинки на панелі контролера або відключення головного вимикача розподільного щитка лабораторії. Якщо швидко вимкнути напругу комутаційними апаратами неможливо, необхідно відокремити потерпілого від струмоведучих частин за допомогою сухих діелектричних засобів або підручних ізолюючих предметів, таких як суха дерев'яна палиця, одяг чи ізолюючий канат, суворо дотримуючись правил власної безпеки та категорично уникаючи дотику до відкритих ділянок тіла потерпілого.

Після звільнення потерпілого від дії струму його необхідно перемістити у добре освітлену і вентилявану зону лабораторії для негайної оцінки загального стану, визначення наявності свідомості, самостійного дихання та пульсу на сонній артерії. Якщо потерпілий перебуває у притомному стані, його слід покласти на суху підстилку, забезпечити повний фізичний і психологічний спокій, розстебнути тісний одяг для полегшення дихання та безперервно контролювати основні життєві показники до прибуття медичного персоналу. У разі відсутності свідомості, але за умови збереження адекватного самостійного дихання, потерпілого переводять у стабільне бокове положення для запобігання западанню язика та аспірації блювотними масами, забезпечуючи вільний доступ повітря. За повної зупинки дихання та серцевої діяльності негайно розпочинають серцево-легеневу реанімацію, яка полягає у проведенні непрямого масажу серця та штучної вентиляції легень у співвідношенні тридцяти інтенсивних натискань на грудну клітку до двох вдуків повітря, продовжуючи ці дії безперервно до відновлення стійких життєвих функцій або приїзду бригади швидкої допомоги.

Окрім електричної небезпеки, автоматичне обертання масивних металевих елементів гоніофотометра GO-2000 по осях С та γ за умови

порушення оператором безпечної відстані створює ризик механічного травмування з виникненням забиттів, синців або відкритих ран. При отриманні механічних пошкоджень із кровотечею першочерговою дією є її зупинка шляхом накладання чистої тисної пов'язки на місце ушкодження та обробка країв рани антисептичним розчином без потрапляння його всередину рани. Також, враховуючи необхідність тривалого перебування ламп в увімкненому стані протягом тридцяти хвилин для термостабілізації, існує ймовірність отримання термічних опіків шкіри при необережному демонтажі або просторовому юстируванню гарячої світлодіодної лампи. У разі виникнення термічного опіку ушкоджену ділянку тіла необхідно негайно охолодити під струменем холодної проточної води протягом десяти–п'ятнадцяти хвилин для зменшення глибини ураження тканин, після чого накласти стерильну суху пов'язку, категорично забороняючи проколювати утворені опікові пухирі або змащувати рану оліями, жирами чи спиртовими розчинами. Усі заходи з надання першої долікарської допомоги повинні здійснюватися чітко, спокійно і паралельно з негайним викликом професійної екстреної медичної служби.

4.7 Забезпечення пожежної безпеки

Забезпечення належного рівня пожежної безпеки на лабораторній дільниці з дослідження характеристик світлодіодних джерел світла є критично важливим організаційно–технічним завданням, спрямованим на захист життя дослідника та збереження дорогоцінного вимірювального обладнання. Як вихідні дані для оцінки пожежної небезпеки розглядаються особливості технологічного процесу вимірювань, який поєднує роботу в абсолютно темній кімнаті із тривалим функціонуванням електротехнічних приладів під напругою до 380 В. Основними елементами робочої зони, що потенційно становлять пожежну небезпеку, є рухомий гоніофотометр GO–2000, еталонні лабораторні блоки живлення, персональний комп'ютер, а також горючі матеріали, до яких належать полімерна ізоляція кабелів живлення, пластикові

корпуси досліджуваних LED-ламп та спроектований 3D-друкований перехідник-адаптер. Особливу увагу з точки зору пожежовибухонебезпеки привертає портативний спектрометр UPRtek MK350S Premium, оскільки його автономна робота забезпечується літєвою акумуляторною батареєю, яка в режимі заряджання або за умов порушення правил експлуатації схильна до критичного перегріву та самозаймання.

На основі кількісного та якісного аналізу горючого навантаження, присутнього у приміщенні (пластики, кабельна ізоляція, елементи оргтехніки), та відповідно до вимог чинних нормативних документів, лабораторна кімната відноситься до категорії В (пожежонебезпечна). Згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), за характером середовища та специфікою розміщення електротехнічного устаткування, даний об'єкт класифікується як пожежонебезпечна зона класу П-ІІа.

Аналіз виробничого процесу з точки зору вірогідності виникнення аварійних ситуацій показує, що основними причинами пожежі можуть стати короткі замикання, струмові перевантаження в електричних мережах через несправність драйверів, а також перегрів електронних компонентів під час їхньої обов'язкової 30-хвилинної термостабілізації. У разі виникнення пожежонебезпечної ситуації, сукупність можливих небезпечних факторів, згідно з нормативними положеннями, включатиме іскри та електричні дуги при аварійних режимах роботи, підвищену температуру поверхонь обладнання, появу диму, а також зниження концентрації кисню в закритому просторі приміщення. Окрему небезпеку становить висока токсичність продуктів згорання полівінілхлоридної ізоляції та конструкційних пластиків ламп, а у випадку теплового розгону літій-іонного акумулятора спектрометра існує загроза локального вибуху та інтенсивного відкритого полум'я.

Одержана інформація покладена в основу розробки комплексної системи протипожежного захисту, яка поєднує технічні та організаційні рішення. Технічні рішення систем запобігання пожеж передбачають використання мідних кабелів, що не підтримують горіння, та обов'язкове

встановлення автоматичних вимикачів із характеристикою відключення типу В номіналом 10 А, які забезпечують швидке знеструмлення вимірювальних стендів при виникненні струмів короткого замикання. У системі протипожежного захисту лабораторії передбачено монтаж автоматичної пожежної сигналізації з точковими димовими сповіщувачами, оскільки саме задимлення є первинною ознакою тління ізоляції, а також винесення кнопок екстреного відключення живлення в доступні зони оператора. Організаційні заходи включають регулярний контроль опору ізоляції проводів, підтримання евакуаційних шляхів у вільному стані, проведення своєчасних інструктажів із персоналом щодо дій при виникненні пожежі та сувору заборону використання відкритого вогню.

Відповідно до чинних положень і норм належності, для гасіння початкових осередків займання в лабораторії виконується підбір первинних засобів пожежогасіння. Оскільки пожежа на даному об'єкті пов'язана із горінням електроустановок під напругою (пожежі класу Е), застосування води чи піни є категорично забороненим через загрозу ураження дослідника електричним струмом. Для комплектації лабораторного приміщення обрано вуглекислотні вогнегасники типу ВВ-2 або ВВ-5 (за старою класифікацією ОУ-2, ОУ-5), які забезпечують швидке пригнічення полум'я шляхом охолодження та витіснення кисню з зони горіння. Перевагою вуглекислотних вогнегасників для даного об'єкта є повна відсутність залишкового забруднення або механічного пошкодження оптичних та електронних вузлів прецизійних спектрометрів і контролерів, що дозволяє зберегти працездатність цінного обладнання після ліквідації займання. Як альтернатива або доповнення, лабораторія оснащується порошковими вогнегасниками типу ВП-2 або ВП-5, що мають універсальний характер дії. Кількість та місця розміщення вогнегасників визначаються відповідно до площі приміщення та вимог правил пожежної безпеки, забезпечуючи постійний та безперешкодний доступ до них з будь-якої точки лабораторії.

Висновки до розділу 4

У розділі «Охорона праці» було проведено комплексний аналіз умов праці на спеціально обладнаній лабораторній ділянці під час дослідження характеристик світлодіодних ламп. На основі специфіки технологічного процесу було ідентифіковано ключові небезпечні та шкідливі виробничі фактори. До фізичних факторів віднесено наявність напруги до 380 В, рухомі елементи автоматизованого гоніофотометра, необхідність виконання робіт в умовах абсолютної темряви, а також негативний вплив пульсації світлового потоку та прямої блискості. До психофізіологічних факторів віднесено зорове та нервово-психічне перенапруження, викликане тривалою адаптацією до темряви та концентрацією уваги.

Для гарантування безпеки та мінімізації ризиків розроблено ефективну систему організаційних і технічних заходів. Визначено, що до роботи допускається лише персонал із групою електробезпеки не нижче III. Передбачено дистанційне управління вимірювальними комплексами, дотримання чітких режимів праці й відпочинку, а також використання необхідних попереджувальних знаків та плакатів. Проведений розрахунок захисного занулення (петлі «фаза-нуль») підтвердив, що опір лінії є достатньо низьким для того, щоб обраний автоматичний вимикач номіналом 10 А з характеристикою відключення типу В спрацював миттєво та надійно знеструмив установку у разі короткого замикання.

Окрім профілактичних заходів, розроблено чіткі алгоритми надання першої долікарської допомоги у випадках ураження електричним струмом, отримання механічних травм від рухомих частин обладнання та термічних опіків від нагрітих ламп. В аспекті пожежної безпеки лабораторну кімнату класифіковано як пожежонебезпечну (категорія В, зона класу П-Іа). Для захисту цінного електронного та оптичного обладнання обґрунтовано вибір вуглекислотних вогнегасників типу ВВ-2 або ВВ-5, які дозволяють безпечно

ліквідовувати загоряння електроустановок під напругою без залишкового забруднення апаратури.

Загалом, суворе дотримання розробленого комплексу організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та протипожежних заходів дозволяє повністю нівелювати вплив небезпечних факторів і гарантувати безпечні, здорові та комфортні умови праці для дослідника на всіх етапах проведення дослідів.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження світлотехнічних, електротехнічних та колориметричних характеристик побутових світлодіодних джерел світла, а також проаналізовано їхній вплив на зоровий комфорт і безпеку людини. За результатами виконаної роботи зроблено наступні висновки:

В аналітичній частині проаналізовано сучасні підходи до вимірювання якості світла. Виявлено, що традиційні метрики (лише через загальний індекс CRI та класичний коефіцієнт пульсації) є застарілими. Для об'єктивної оцінки безпеки освітлення запропоновано застосовувати сучасні метрики: стандарт TM-30, показники видимого і невидимого флікеру (PstLM та SVM), а також методи меланопічної фотометрії. Крім того, встановлено негативний вплив на фізіологію: використання неякісних світлодіодів із надмірним синім піком у спектрі (колірна температура понад 7000 K) та високим рівнем мерехтіння викликає перенапруження зорового аналізатора і пригнічує секрецію мелатоніну, що веде до порушення добових ритмів.

У другій (світлотехнічній) частині зроблено удосконалення апаратної бази та розроблено строгу методику лабораторних вимірювань, що включає роботу в умовах абсолютної темряви та термостабілізацію зразків. Модернізовано фотометричну кулю шляхом розробки та 3D-друку спеціального перехідника, що дозволило застосувати прецизійний спектрометр UPRtek MK350S Premium для високоточного збору даних.

У третій частині під час тестування 17 зразків комерційних світлодіодних ламп виявлено, що значна частина продукції має суттєві розбіжності між фактичними та заявленими параметрами споживаної потужності і світлового потоку (світловіддача варіювалася від 41,9 лм/Вт до 142,9 лм/Вт). За результатами вимірювань запропоновано виокремити групу небезпечних для зору зразків (№9, №10, №14 та №15), експлуатація яких є недопустимою через екстремальний стробоскопічний ефект ($SVM > 4,2$),

небезпечний рівень низькочастотного флікера, спотворену кольоропередачу ($CRI < 70$) та глибокий дефіцит червоного випромінювання (від'ємні значення $R9$).

У розділі з охорони праці зроблено розрахунок захисного занулення (опір петлі «фаза–нуль» становить 0,48 Ом, що підтверджує надійність спрацьовування захисних автоматів) та розроблено комплекс технічних і організаційних заходів для безпечного проведення вимірювань з електрообладнанням під напругою до 380 В. Лабораторію класифіковано як пожежонебезпечну (категорія В), для якої запропоновано та обґрунтовано використання вуглекислотних вогнегасників з метою безпечного гасіння без пошкодження електронної апаратури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пітяков О. С. Умови виконання «Меланопсинового хреста» та фотобіологічна безпека при світлодіодному освітленні приміщень // *Scientific Horizon in the Context of Social Crises*. – Tokyo, Japan, 2023. – No 144. – С. 343–351.
2. Baghirov S., Pitiakov O., Shpak S., Kyslytsia S., Sakhno T., Kozhushko H. Research of Problems Flicker Level of LED Lamps and Luminaires for General Lighting // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2023. – R. 99, No 12. – P. 119–123.
3. Neyezhmakov P., Pitiakov O., Shpak S., Baghirov S., Sakhno T., Kozhushko G. Luminance flicker of LED lamps and lighting fittings for general lighting // *Ukrainian Metrological Journal*. – 2022. – No 3. – P. 33–42.
4. Назаренко Л. А., Діденко О. М. Меланопічна фотометрія // *Український метрологічний журнал*. – 2023. – № 3. – С. 37–44.
5. Pitiakov O. S., Neyezhmakov P. I., Shpak S. V., Kyslytsia S. H., Kozhushko H. M. Photobiological safety of image projectors with halogen incandescent lamps // *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*. – 2022. – Issue 53, Vol. 14, No 4. – P. 123–127.
6. Baghirov S., Kharchenko V., Shpak S., Pitiakov O., Kyslytsia S., Sakhno T., Kozhushko H. Influence of eco–design policy and energy labeling on the level of energy efficiency and functionality of LED lamps // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2025. – N 2. – P. 13–21.
7. Пітяков О. С., Кісь А. А. Штучний інтелект світлотехнічних систем // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique*. – Paris, République française, 2023. – P. 98–101.
8. Shpak S., Kozhushko G., Kyslytsia S., Sakhno T., & Pitiakov O. Research of the Photobiological Safety of LED Lamps and Luminaires for General Lighting // *Ukrainian Metrological Journal*. – 2020. – No 4. – P. 29–35.

9. Назаренко Л. А., Діденко О. М. Меланопічна фотометрія // Матеріали міжнар. наук. –практ. конф. «Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці» (16–17 травня 2024 р.). – Харків: ХНУМГ, 2024. – С. 110–112.
10. Baghirov S. A. Study of Energy Efficiency Indicators of LED Light Sources // International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE). – 2023. – Issue 57, Vol. 15, No 4. – P. 67–71.
11. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5 – 28 – 2018 : Держбуд України чинний з 01.01.2019. – К. : Держ. комітет України з будівництва та архітектури, 2018. – 76 с.
12. Технологія світлотехнічного виробництва: навч. посібник / Г. О. Петченко, А. С. Литвиненко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. господарства імені О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ імені О.М. Бекетова, 2019. – 147с.
13. Овчинников С. С. Конспект лекцій з курсу «Фізіологічна оптика та колориметрія» (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом 0906 (6.050701) «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Світлотехніка і джерела світла») / С. С. Овчинников, М. М. Таряник, О. В. Лутай; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 79 с.
14. Колесник А. І., Усіченко Д. О., Назаренко Л. А. Спектральні і фотометричні методи контролю параметрів світлодіодних джерел випромінювання // Журнал нано- та електронної фізики. 2019. Т. 11, № 1. С. 01002-1–01002-6.
15. Колесник А. І., Усіченко Д. О., Назаренко Л. А. Дослідження теплових режимів та спектральних характеристик зразків світлодіодного світильника // Метрологія та прилади. 2019. № 1 (75). С. 37–41.
16. Поліщук В. М. Фотометрія : конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. М. Поліщук ;

Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 157 с.

17. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Джерела світла» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. Д. Гуракова, К. І. Суворова, Л. Г. Баландаєва. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 48 с.

18. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник / Л. А. Назаренко, А. І. Колесник ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 255 с.

19. Серіков Я.О. Основи охорони праці / Навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів. Харків. ІОЦ ХНАМГ, 2007. – 227 с.

20. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: ДНАОП 0.00–1.21–98. Наказ Держнаглядохоронпраці від 09. 01. 98 № 4. Міністерстві юстиції України 10. 02. 98 за № 93/2533. Дата введення 20. 02. 98.

21. Правила пожежної безпеки в Україні: НАПБ А.01.001–2014. Міністерство внутрішніх справ (МВС) чинний з 07.04.2023. Міністерства внутрішніх справ України 2022.