

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої** **освіти**

на тему
“ Аналіз енергетичної ефективності джерел світла у виробничих
умовах”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр ПОТЬОМКІН
« ____ » _____ 2023 р.
Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
« ____ » _____ 2023 р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *14 Електрична інженерія*

Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Освітньо-професійна програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плещков П.Г.

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Потьомкін Олександр Олегович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Аналіз енергетичної ефективності джерел світла у виробничих умовах*

Analysis of the energy efficiency of light sources in production conditions

2. Керівник роботи (проекту) *Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент*

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *30.12.2023 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Підвищення точності оцінки енергоефективності джерел світла в процесі експлуатації, які впливають якісні та кількісні параметри освітлювальних установок. Аналіз сучасного стану впливу електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла на їх енергоефективність. Вплив електричних, спектральних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів на енергоефективність джерел світла. Особливості характеристик джерел світла в стаціонарних та динамічних режимах експлуатації.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>10.10.23</i>	
2	<i>Аналіз впливу електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла на їх енергоефективність</i>	<i>16.10.23</i>	
3	<i>Вплив технічних параметрів на енергоефективність джерел світла</i>	<i>28.10.23</i>	
4	<i>Особливості характеристик джерел світла в стаціонарних та динамічних режимах експлуатації</i>	<i>16.11.23</i>	
5	<i>Формування системного підходу для визначення енергоефективності джерел світла</i>	<i>30.11.23</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>06.12.23</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>12.12.23</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	<i>25.12.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Потьомкін О. Аналіз енергетичної ефективності джерел світла у виробничих умовах

Analysis of the energy efficiency of light sources in production conditions

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2023 р.

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз сучасного стану досліджень динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації і регулювання світлового потоку та методів оцінки енергоефективності освітлювальних установок, побудованих на їх основі. Встановленні математичні залежності номінальної світлової віддачі від номінальної потужності для існуючих типів джерел світла. Виконано дослідження енергоефективності регулювання світлового потоку джерел світла та освітлювальних установок з метою встановлення діапазонів напруг та струмів, в яких регулювання світлового потоку є найбільш вигідним. Побудовані математичні моделі електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла, придатних для визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

Досліджена динаміка електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації в перехідних та усталених режимах.

ДЖЕРЕЛА СВІТЛА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СВІЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОСВІТЛЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ.

ABSTRACT

POTOMKIN O. Analysis of the energy efficiency of light sources in production conditions

«Аналіз енергетичної ефективності джерел світла у виробничих умовах»

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP "Electrical systems of power consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2023

The qualification work includes an analysis of the current state of research on the dynamics of electrical, lighting, and operational parameters of light sources during operation and regulation of light flux, as well as methods for evaluating the energy efficiency of lighting installations built on their basis. Mathematical dependencies of nominal luminous efficacy on nominal power are established for existing types of light sources.

Research on the energy efficiency of light flux regulation for light sources and lighting installations has been conducted to determine the voltage and current ranges in which light flux regulation is most advantageous.

Mathematical models of electrical and lighting parameters of semiconductor light sources have been constructed, suitable for determining their energy efficiency in the process of regulating light flux.

The dynamics of electrical, lighting, and operational parameters of light sources have been investigated during operation in transient and steady-state modes.

LIGHT SOURCES, ENERGY EFFICIENCY, LIGHTING CHARACTERISTICS, ILLUMINATING INSTALLATIONS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА.....	13
1.1 Стан проблеми енергозбереження в системах освітлення	13
1.2 Аналіз раціонального використання джерел світла	14
1.3 Аналіз конструктивних особливостей на світловіддачу ламп ..	18
1.4 Сучасні підходи визначення енергоефективності в	
освітлювальних установках	22
Висновки з розділу.....	29
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	
НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.....	30
2.1 Сучасні проблеми енергоефективного освітлення.....	30
2.2 Дослідження рівня світловіддачі від потужності	
освітлювальних установок	31
2.3 Дослідження світловіддачі ламп білого світла	36
Висновки з розділу.....	41
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В РІЗНИХ	
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ	42
3.1 Дослідження світлового потоку в процесі експлуатації	42
3.2 Дослідження експлуатаційних характеристик світлодіодних	
ламп	46
Висновки з розділу.....	57
4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА	
58	
4.1 Оцінка енергоефективності джерел світла.....	58

4.2	Енергоефективність регулювання світловіддачі в лампах розжарювання та світлодіодних лампах	59
	Висновки з розділу.....	67
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
	ДОДАТКИ.....	75
	Додаток А.....	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ABX	-	ампер-вольтна характеристика
BAХ	-	вольт-амперна характеристика
ВІК	-	вимірювальний інформаційний комплекс
ГОСТ	-	міждержавний стандарт
ДНаТ	-	дугова натрієва трубчаста розрядна лампа
ДРІ	-	дугова розрядна лампа високого тиску з йодидами
ДРЛ	-	дугова розрядна лампа високого тиску з люмінофор
ДС	-	джерело світла
ЕмПРА-	-	електромагнітний пускорегулювальний апарат
ЕПРА	-	електронний пускорегулювальний апарат
КГЛР	-	кварцово-галогенні лампи розжарювання
ККД	-	коефіцієнт корисної дії
КЛЛ	-	компактна люмінесцентна лампа
КП	-	коефіцієнт потужності
КПСП-	-	коефіцієнт пульсацій світлового потоку
ЛАТР	-	лабораторний автотрансформатор
ЛЛ	-	люмінесцентна лампа
ЛР	-	лампа розжарювання
ЛРЗП	-	лампа розжарювання загального призначення
МКО	-	Міжнародна комісія по освітленню
НДС	-	напівпровідникове джерело світла
ОП	-	освітлювальний прилад
ОУ	-	освітлювальна установка
ПЕР	-	паливно-енергетичні ресурси
ПРА	-	пускорегулювальний апарат
РЛ	-	розрядна лампа
РЛВТ	-	розрядна лампа високого тиску
СДЛ	-	світлодідна лампа

ВСТУП

Одним із головних завдань енергетичної стратегії є вирішення питань, пов'язаних з енергозбереженням, зокрема збереженням електроенергії, використовуваної для освітлення. Існуючі технології освітлення базуються на широкому спектрі ламп розжарювання. Проте лише до 7% електроенергії, витраченої на розжарювання ламп, перетворюється на світло, а решта переходить у тепло та інші види випромінювання.

Досягнення в області оптоелектроніки призвели до розробки світлодіодних джерел світла, енергоефективність яких перевищує витрати енергії на розжарювання ламп від 8 до 12 разів. Використання цих джерел може значно знизити споживання електроенергії для освітлення та обслуговування електромережі, підняти рівень екологічної безпеки і спростити створення автоматизованих систем управління мережами освітлення та світлосигнальним обладнанням.

З урахуванням постійного зростання вартості електроенергії для міста, нагальним стає питання ефективного її використання. Незважаючи на впроваджені заходи з економії електроенергії, досягти максимального ефекту є складним завданням через застарілість частини використовуваних освітлювальних приладів та їхню низьку світловіддачу. В цих умовах важливим стає використання енергоефективних джерел освітлення. Сучасне світлодіодне освітлення є ефективною альтернативою лампам розжарювання та навіть люмінесцентним лампам, ґрунтоване на високоефективних технологіях збереження енергії, які дозволяють рішуче вирішити проблеми енергетичної неефективності.

Сьогоднішній день свідчить, що для освітлення бюджетних установ та адміністративних приміщень 35% використовують лампи розжарювання, а на комунальних підприємствах та в громадських місцях багатоквартирних будинків понад 90% використовуються застарілі лампи розжарювання, які

не є енергоефективними та не відповідають сучасним критеріям енергозбереження. Заміна цих ламп світлодіодними джерелами надає можливість економії електроенергії та зменшення витрат міського бюджету на споживання електроенергії.

Вигляд кожного міста визначається станом благоустрою, включаючи систему вуличного освітлення. За експертною оцінкою, експлуатаційні характеристики електромереж зовнішнього освітлення є досить низькими. Внаслідок використання застарілих світлових приладів систем освітлення виникають значні витрати електроенергії. Частково прилади, що забезпечують вуличне освітлення міста, характеризуються низькою ефективністю. Приблизно 35% всіх джерел світла є низько-ефективними лампами розжарювання.

Фактичний обсяг використання енергоносіїв за останні роки залишається незначно зростає, що збільшує витрати підприємств та організацій на оплату використаної електроенергії. Головною причиною цього зростання є підвищення вартості електроенергії. За прогнозами, тарифи будуть продовжувати зростати.

Високі показники енергоспоживання та постійний приріст витрат на електроенергію створюють необхідність у реалізації комплексних заходів з енергозбереження. Це свідчить про актуальність застосування сучасних та енергоефективних світильників.

Світлотехнічна галузь, яка виключно спрямована на освітлення, використовує близько 3000 ТВт*год електроенергії щорічно, перевищуючи загальне виробництво електроенергії всіма атомними електростанціями у світі. Це відбувається навіть враховуючи те, що в країнах Південної Азії та Африки), спостерігається дефіцит електроенергії. Тому, для обмеження обсягів енергоспоживання на освітлення, зберігаючи його якість і враховуючи необхідне зростання кількості споживачів, необхідно активно впроваджувати останні наукові розробки у цій сфері за рахунок:

1. Поширення використання напівпровідникових джерел світла, які характеризуються високою світловою віддачею (до 250 лм/Вт), довгою тривалістю служби (до 100 тис. годин) та компактністю;
2. Використання високоефективних люмінесцентних ламп типу Т8, які мають на 1 рік більшу середню тривалість служби;
3. Використання розрядних ламп високого тиску типу ДНаТ в системах зовнішнього освітлення.
4. Впровадження заходів щодо стабілізації відхилення напруги в мережах освітлювальних установок
5. Оптимізація систем управління освітленням, що передбачає вмикання та вимикання світла з урахуванням робочого графіку.
6. Забезпечення високих значень електромагнітної сумісності ОУ з електричними мережами.

Розуміючи, що ефективність кожного з вищенаведених заходів може варіюватися, важливо визначати джерела світла на основі їхніх характеристик, зокрема світлової віддачі та тривалості служби.

Тому для забезпечення нейтральності при оцінці енергоефективності різних варіантів освітлення важливо урахувати всі фактори, які впливають на економічну результативність при впровадженні кожної конкретної інновації. Для досягнення цього мета слід використовувати системний підхід при оцінці енергоефективності джерел світла на етапі їх вибору та впровадження в усіх сферах людської діяльності.

Метою дослідження є розробка підходів для ефективної оцінки світлових джерел та освітлювальних установок. Для досягнення цієї мети передбачено розв'язання таких завдань:

1. Визначення технологічних параметрів світлових джерел у процесі експлуатації, а також розробка методів оцінки енергоефективності освітлювальних установок.

2. Встановлення математичної залежності світловими віддачею та потужністю для різних типів світлових джерел.

3. Розробка системного підходу до оцінки енергоефективності світлових джерел.

4. Дослідження технологічних параметрів світлових джерел в процесі експлуатації в динамічних та статичних режимах.

Об'єктом дослідження є динамічні та статичні режими світлових джерел, а предметом - параметри світлових джерел та режими їхньої експлуатації, як взаємопов'язані елементи освітлювальних установок.

Методологія дослідження включає теоретико-експериментальні дослідження перехідних процесів та усталених режимів експлуатації світлових джерел. Планування та обробка експериментальних даних здійснюються за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні та вирішенні важливої науково-технічної проблеми, пов'язаної із підвищенням адекватності оцінки енергоефективності світлових джерел.

Робота включає в себе побудову математичних моделей електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла, а також визначення їхньої енергоефективності при регулюванні світлового потоку.

Результати мають практичне застосування і можуть бути використані для розробки рекомендацій з ефективного регулювання світлового потоку світлових джерел.

РОЗДІЛ 1

1 АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

1.1 Стан проблеми енергозбереження в системах освітлення

Енергія є дуже важливим фактором для існування та прогресу суспільства, а енергетика виступає ключовим елементом в цьому контексті. Її роль визначальна як для економіки, так і для екології, впливаючи на економічний потенціал країн і життєвий стандарт населення. Енергія має значущий вплив на навколишнє середовище, екосистему та біосферу загалом, що безпосередньо або опосередковано пов'язане із виробництвом та використанням енергії.

Найактуальніші екологічні проблеми, такі як зміна клімату, кислотні дощі та глобальне забруднення середовища, безпосередньо залежать від процесів виробництва та використання енергії. Енергетика має першість у різних видах забруднення, включаючи теплове, аерозольне, електромагнітне та радіоактивне забруднення. Вирішення проблем, пов'язаних із енергетикою, визначає можливість вирішення основних екологічних викликів.

Сучасна ефективна енергетична політика має базуватися на принципах енергобезпеки, енергоефективності, енергозбереження та екологічної гармонізації суспільного розвитку.

Глобальний попит на штучне освітлення, хоча й великий за масштабами, проте неоднорідний і ще не досягнув насичення. Економічні тенденції вказують, що до 2030 року світовий попит на електроенергію в системах освітлення виросте вдвічі.

Якщо ці прогнози справдяться і технологічний прогрес не прискориться, світовий попит на електричне освітлення може споживати більше 4000 млн. кВт×год. Це майже вдвічі перевищує обсяги виробництва

електроенергії всіма сучасними атомними електростанціями світу. В наш час на освітлення використовує лише близько 18-22 % від загального обсягу виробництва електроенергії на планеті. При цьому лампи розжарення (ЛР) забирають четвертину, а інші джерела світла (ДС) близько 75% електроенергії.

На глобальному рівні розподіл використання електроенергії для освітлення є наступним: а) вуличне – 7%; б) промисловий сектор – 15%; в) житловий сектор – 21%; г) сектор обслуговування – 57%.

Україна витрачає приблизно 13% електроенергії на освітлення щорічно. Хоча це подібно до розвинених країн світу на душу населення, ефективність використання є дуже низькою. Причини цього включають:

- а) значну кількість низькоефективних старих ламп розжарювання;
- б) низьку енергоефективність встановлених люмінесцентних ламп;
- в) відсутність обґрунтованих підходів до керування освітленням енергоефективних зон та методів управління освітлювальних установок.

1.2 Аналіз раціонального використання джерел світла

Аналіз раціонального використання джерел світла вказує на те, що ефективне використання електроенергії та коштів для освітлення можна досягти переважно за допомогою енергоефективних джерел світла. На сьогодні в різних галузях людської діяльності застосовуються переважно чотири категорії джерел світла:

Теплові джерела світла (ТДС) (кварцово-галогенні лампи, лампи розжарення), які є вигідними, зручними у використанні, легко регульованими та мають привабливий дизайн та середній термін роботи до 5-15 тис. год [13]. Незважаючи на це, лампи розжарення загального

призначення (ЛР) було запропоновано поетапно вилучити з експлуатації через їхню низьку енергоефективність [13]. Проте це не спричинило їхнього повного відсутності на ринку. В більшості країн світу лампи розжарення почали продавати як "обігрівачі кульки" з ККД більше 95% [16].

Кварцово-галогенні лампи мають як вищий світловий видачу, так і СТС, що дозволяє економити до 30% електроенергії. Введення на ринок капсульних КГЛР у прозорих та матових колбах з напругою 220 В значно посилило їх популярність в побутовому секторі [17]. Ця категорія теплових ламп залишається ще значною часткою використання в найближчому майбутньому.

Лампи високого тиску з розрядом (ЛВТР) застосовуються у трьох різних варіантах:

- 1) ртутний – це світлодіоди типу ДРЛ;
- 2) ртутний з додатковими галоїдними сполуками та рідкоземельними металами – це світловідбійники типу ДРІ;
- 3) ртутно-натрієвий – це світлодіоди типу ДНаТ.

Об'єми виробництва цих освітлювальних приладів розташовуються на третьому місці після теплових світлодіодів і люмінесцентних ламп і становлять близько 10% від загального обсягу виробництва ламп.

Люмінесцентні лампи, які включають лінійні, компактні і безелектродні моделі, працюють на принципі трансформації ультрафіолетового випромінювання ртутного розряду у видимий спектр за допомогою люмінофорів. Компактні лампи (КЛЛ), спроектовані для заміни ламп розжарювання, швидко виявили такі обмеження, як:

- а) потреба в спеціальній утилізації через наявність мінімум 5 мг ртуті у кожній лампі;
- б) менша світлова віддача та тривалість світіння, порівняно з прямими люмінесцентними лампами, через більш складну форму та більше відносне навантаження на люмінофор;

в) обіцяна економія електроенергії не досягає вказаного співвідношення 1:5 на практиці, а обмежується 1:4;

г) чутливість до частого ввімкнення – до 3 000 циклів включення/виключення за 8 000 годин роботи;

д) зміна кольору випромінювання під час розгортання, сприймається око якісною зміною протягом перших 10 хвилин після увімкнення.

Безелектродна низькочастотна люмінесцентна лампа ($f = 250$ кГц) працює на основі принципу кругового індуктивного розряду. Кільцева лампа оточена двома феритовими магнітопроводами з обмотками, з'єднаними послідовно узгоджено, утворюючи трансформатор, де функції вторинної обмотки виконує замкнений дуговий розряд. Енергоефективність лампи визначається втратами у фериті і тиском буферного газу (криптон) всередині лампи. Для мінімізації втрат у фериті співвідношення втрат в магнітопроводі до потужності розряду повинно бути мінімальним. Це призводить до великого розрядного струму від 7,1 А для 70 Вт до 11,5 А для 150 Вт.

Головні переваги полягають у великій тривалості світіння до 60 000 годин і стабільній роботі в широкому діапазоні температур до мінус 40°C.

Світлодіодні лампи на основі напівпровідників (СДЛ) відрізняються високою яскравістю та порівняною вартістю. При цьому вони є безінерційними, компактними та простими у регулюванні світлового потоку в межах від 0 до 100%, що надає можливість реалізації різноманітних стилістичних рішень.

В сучасності світлодіоди широко використовуються в автомобільній промисловості для виробництва фар, світлосигнальних та габаритних вогнів, а також для світлофорів. Вони ідеально підходять для освітлення рекламних табло, дорожніх інформаційних бордів, сигнальних вогнів, архітектурного підсвічування, а також освітлення фонтанів та інших об'єктів. Очікується постійний ріст кількості світлодіодних модулів та

пристроїв для освітлення, який охоплюватиме як комерційний, вуличний та промисловий ринки, так і ринок побутового освітлення.

Динаміка витіснення інших джерел світла цього процесу залежатиме від темпів та ефективності вирішення недоліків, що притаманні НДС, основними з яких є висока ціна, а також низький індекс передачі кольору, висока колірна температура та труднощі з тепловідведенням.

Тому для підвищення енергоефективності освітлення у першу чергу необхідно впроваджувати високоефективні джерела світла. Серед них можна відзначити розрядні лампи низького тиску, такі як лінійні люмінесцентні лампи для адміністративних і комерційних будівель, та компактні люмінесцентні лампи для побутового сектору. Також важливими є розрядні лампи високого тиску, такі як лампи типу ДРЛ, ДРІ, дугові ртутно-вольфрамові (ДРВ) для промислового освітлення, а також зовнішні лампи типу ДНаТ. Додатково до цього, світлодіоди, які є енергоефективними, потребують значних покращень у їхніх техніко-економічних показниках.

Усі зазначені джерела світла, на відміну від ЛР та КВГЛ, вимагають використання пускорегулювальної апаратури. Пускорегулювальні апарати для розрядних ламп повинні гарантувати надійне запалювання і стабілізацію розряду, можливість керування світловим потоком та захист від аварійних режимів. Щодо пускорегулювальних апаратів для світлодіодів, вони повинні точно підтримувати струм у всіх послідовно-паралельних ланках світлодіодів або температуру радіатора, на якому вони розташовані. Бажано, щоб ці апарати мали можливість автоматичного регулювання світлового потоку та колірної температури залежно від рівня природного освітлення та часу доби, а також функції дистанційного керування через інфрачервоні та радіочастотні канали. У загальному, всі пускорегулювальні апарати повинні відзначатися хорошою електромагнітною сумісністю з мережею живлення та високим

коефіцієнтом потужності.

1.3 Аналіз конструктивних особливостей на світловіддачу ламп

Притаманна природньому світлу мінливість, яка характеризується періодичним закриванням світлого сонячного проміння хмарами, зазвичай має позитивний вплив на організм людини. У той час, коли сучасні джерела світла, зокрема розрядні лампи, генерують світловий потік, що коливається з подвоєною частотою напруги мережі, це накладає свій 100-герцовий ритм на весь організм [41]. Хоча пульсації такої частоти невидимі для людського ока, їхній негативний вплив на самопочуття (наприклад, постійне скорочення м'язів вій ока, що може призвести до втоми та розвитку короткозорості [43]), а також на психіку, працездатність та рівень втоми, асоціюється з ними. Також вони можуть впливати на сприйняття навколишніх предметів, спричиняючи стробоскопічний ефект - сприйняття швидкорухомих предметів в умовах пульсуючого освітлення як нерухомих чи в повільному русі, але з іншою, ніж фактична, частотою в довільному напрямку [44-45]. Таким чином, пульсації, як феномен, представляють собою модуляцію світлового потоку лампи, обумовлену флуктуаціями миттєвих значень напруги мережі живлення [49].

Пульсації світлового потоку, що виникають від існуючих джерел світла, були предметом досліджень вчених з різних країн, які вивчали їхній можливий негативний вплив на здоров'я та працездатність людини. Науково доведено, що величина пульсацій у ламп на основі люмінофорів залежить від короткого часу післясвітіння люмінофору та проходження розряду через нього. Люмінофори виявляються найбільш інерційними, а їх внесок у світловий потік лампи становить близько 90%. З іншого боку, рідкоземельні люмінофори, менш інерційні, призводять до більших пульсацій світлового потоку у лампах на їхній основі [48].

Існують пропозиції знизити пульсації світлового потоку:

- розробки люмінофорів з великим часом післясвітіння;
- живлення ламп струмом прямокутної форми;
- живлення високочастотним струмом з частотами більше 20 кГц,
- одночасного живлення джерел світла струмами на різних

частотах

Для ефективного зниження пульсацій освітленості на робочих поверхнях найбільш ефективним є використання схем із розщепленою фазою та підключення джерел світла до різних фаз напруги живлення.

У той самий період частота коливань в наявних документах не визначається явно, проте проведені медичні дослідження підтверджують, що зазначені обмеження важливі для частот до 300 Гц. Коливання з частотою понад 300 Гц не мають шкідливого впливу. Мозок також не реагує на пульсації світлового потоку при частоті 100 Гц.

Аналіз літературних джерел вказує, що величина коефіцієнта пульсацій світлового потоку залежить від принципу роботи світлодіодних джерел світла [42, 46]. У теплових світлодіодах (ТСД) цей коефіцієнт найменший, знаходячись в межах до 18%. Його значення залежить від маси (інерції) тіла, яке нагрівається. Зі збільшенням потужності зростає і маса розжарювання, а отже, і його інерційність у відношенні до процесів нагрівання та остигання протягом кожної половини періоду напруги живлення. У кварцово-галогенових лампах також спостерігається розжарювання та пульсації світлового потоку, але є особливості, пов'язані з різноманітністю їхніх конструкцій. Слід зауважити, що ТСД можуть працювати від джерел постійної напруги за умови дотримання вказаних параметрів потужності джерел світла, у таких випадках пульсації світлового потоку відсутні. У флуоресцентних лампах, що працюють в мережі промислової частоти (60 Гц) з електромагнітним пускорегулюючим апаратом (ЕмПРА), світловий потік пульсує з частотою 120 Гц, а коефіцієнт

пульсації сягає до 75% (рис. 1.1 а-в).

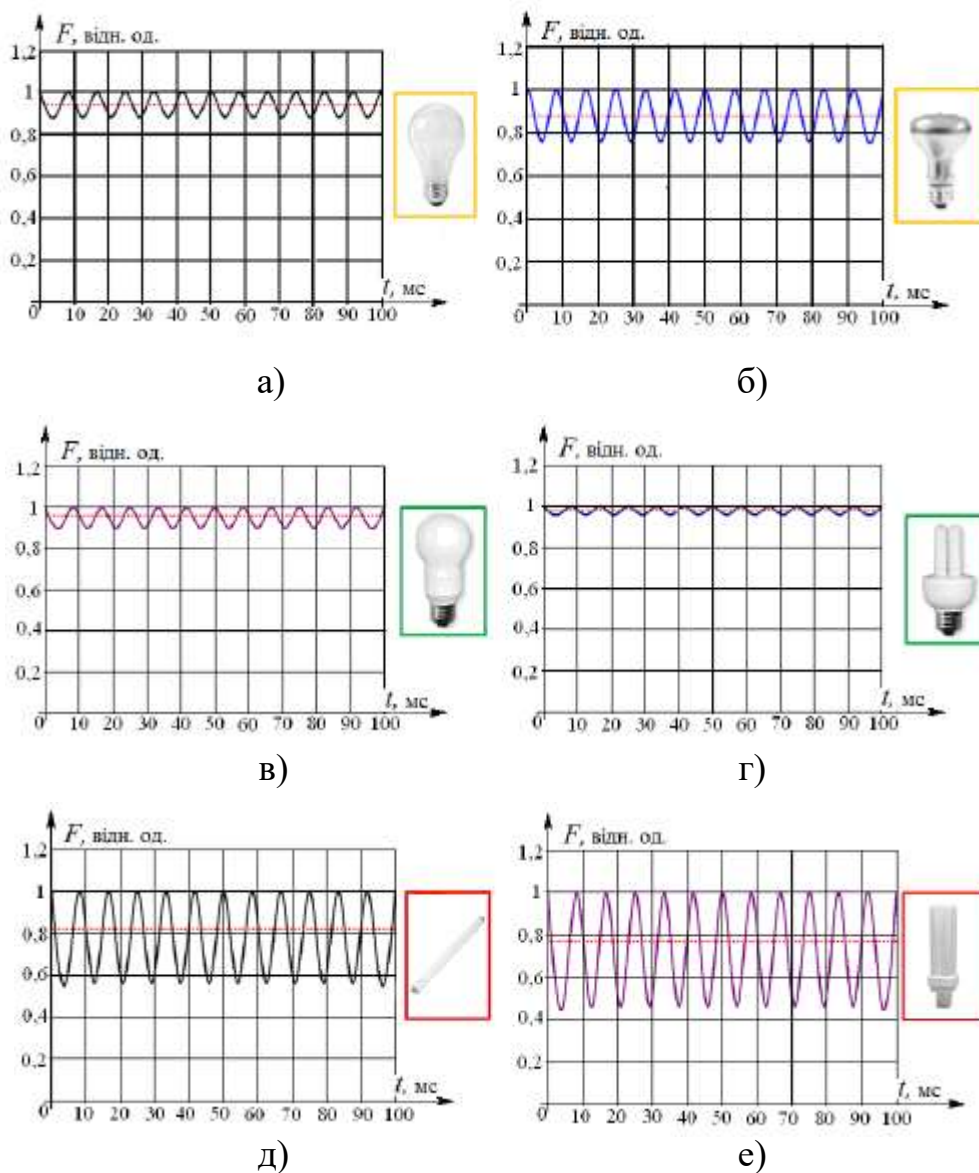


Рисунок 1.1 - Пульсації світлового потоку різних типів ламп

а) -ЛР; б) МТГЛ; в), г), е) ККЛ; д) ЛЛ

У СДЛ, які працюють виключно в мережі постійного струму, коефіцієнт пульсацій формується відповідно до якості драйвера і схеми з'єднання світлодіодів. Якщо на виході джерела живлення є конденсатор, то виробник може гарантувати лише амплітуду пульсацій вихідної напруги. При цьому пульсації струму, які визначають пульсації світлового потоку, будуть вищими. Це залежить від кількості та типу з'єднаних світлодіодів.

Взаємозв'язок між пульсаціями струму світлодіодів та пульсаціями вихідної напруги визначається диференціальним опором світлодіода при номінальних параметрах роботи. Чим вищий нахил робочої ділянки вольт-амперної характеристики (ВАХ), тим більший диференціальний опір.

При послідовному з'єднанні світлодіодів їхні опори сумуються, тому нахил характеристики зменшується (крива 2, рис. 1.2). При паралельному з'єднанні світлодіодів або використанні багатьох кристалічних світлодіодів, з'єднаних внутрішньо, їх опір зменшується, а нахил характеристики збільшується (крива 1, рис. 1.2).

Якщо на графіку рис. 1.2 побудувати вихідну вольт-амперну характеристику джерела живлення (пряма 3), то в точках її перетину з вольт-амперною характеристикою СДІ отримаємо робочі точки. Якщо на виході джерела живлення виникнуть пульсації напруги з амплітудою dU_1 , то графічно можна визначити пульсації струму (крива 2, рис. 1.2).

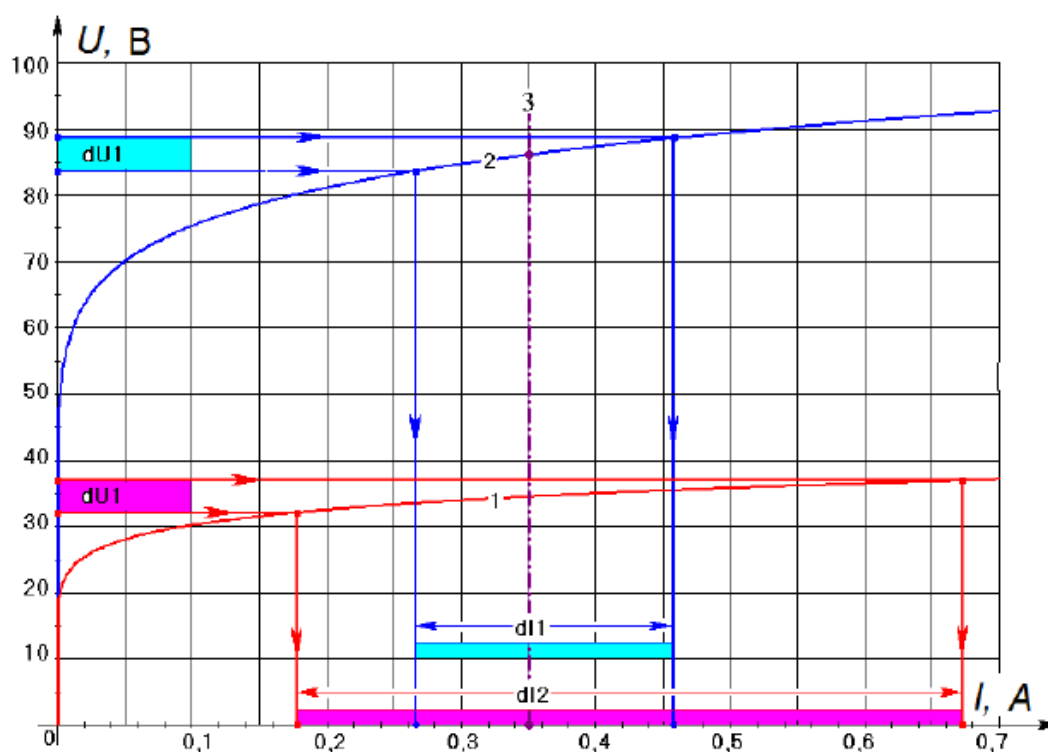


Рисунок 1.2 – Залежність крутизни ВАХ та рівнями пульсацій струму або напруги.

В якості регуляторів світлового потоку часто використовують тиристорні димери, які призводять до значного підвищення коефіцієнта

пульсації світлового потоку ДС. Причиною цього є їхній принцип дії, що полягає в тому, що синусоїдальна напруга мережі живлення подається на ДС не безперервно, а частинами. Таким чином, чим вища встановлена яскравість лампи, тим більше частини півперіоду синусоїдальної напруги мережі живлення подається на неї, і, відповідно, чим нижча встановлена яскравість ДС, тим менше частини півперіоду синусоїдальної напруги мережі живлення подається на лампу.

Для економії електроенергії в освітлювальних системах різного призначення все частіше використовують автоматизовані системи регулювання (димерування) світлового потоку, потрібні дані не лише щодо динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів обраних ДС під час димерування, але і коефіцієнта пульсацій світлового потоку.

1.4 Сучасні підходи визначення енергоефективності в освітлювальних установках

Концепція енергоефективного освітлення включає в себе:

- а) забезпечення нормативного рівня освітленості у визначеному місці в потрібний час, коли в приміщенні перебувають люди, за допомогою оптимізації розташування світильників, вибору кольору та контрасту;
- б) виконання якісних нормативних показників (відсутність відбитої яскравості та пульсацій світлового потоку вище допустимого рівня);
- в) дотримання екологічних стандартів.

В всьому світі постійно розробляють та вдосконалюють програми енергозбереження в освітлювальних системах, спрямовані на заміну неефективних ДС на більш продуктивні та впровадження електронних

пускорегулювальних апаратів для витіснення електромагнітних.

Останні аналітичні огляди наукової літератури світу виокремили певні зміни у ключових показниках, пов'язаних із визначенням енергоефективності джерел світла (ДС) та освітлювальних установок (ОУ).

До найбільш відомих і широко використовуваних показників енергоефективності належить світлова віддача. Цей показник змінюється від 0,04 лм/Вт для свічок до 200 лм/Вт для розрядних ламп низького тиску, таких як ДНаТ.

Слід зазначити, що він відображає енергоефективність лише теплових джерел світла, світлодіодних ламп (СДЛ) та компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ).

Для визначення реального потенціалу енергозбереження в країні та найбільш ймовірних перспектив розвитку світлотехнічного ринку, запропоновано в одночасно оцінювати обсяг спожитої електроенергії різними типами джерел світла та обсяг світлової енергії, яку вони генерують протягом певного періоду часу (на річний період).

Сумарний обсяг електроенергії, використаної кожною групою ламп протягом року, пропонується розраховувати за наступною формулою:

$$W_{\Sigma} = N_{\text{ср}} \cdot P_{\text{ср}} \cdot \tau_p, \text{ кВт} \times \text{год}, \quad (1.1)$$

де: N_p - середньорічна ємність ринку даної групи джерел світла у штуках;
 P_p - середня потужність ламп, кВт; τ_p - термін експлуатації лампи протягом року у годинах.

Зазначені параметри використовуються для розрахунку сумарної світлової енергії, яку генерують лампи:

$$Q_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot H_{\text{ср}} \cdot \tau_p, \text{ Млм} \times \text{год}, \quad (1.2)$$

Розрахунки вказали, що лише 6% світлової енергії генерується 25%

лампами розжарювання (ЛР). Це свідчить про те, що найбільший потенціал для енергозбереження в найближчому майбутньому представлений ЛР, завдяки впровадженню світлодіодних ламп (КЛЛ), люмінесцентних ламп (ЛЛ) і розрядних ламп з високочастотним запалюванням (РЛВТ). Ці типи ламп забезпечують 91% генерації світлового потоку.

Наразі дуже популярним є класифікація джерел світла за енергоефективністю. Згідно з директивами Європейського союзу в галузі енергетики та транспорту, на упаковках джерел світла наноситься етикетка енергоефективності (згідно з Директивою 2009/125/ЄС), на якій чітко вказані основні споживчі характеристики товару.

Рівень використання енергії оцінюється за класами від А до G, де клас А має найменше споживання енергії, а клас G - найбільше. Етикетка також містить іншу важливу інформацію про товар, таку як світловий потік, номінальна потужність, коефіцієнт світловіддачі (СТС), колірна температура, розмір цоколя і номінальна напруга.

ЛЛ без вбудованого пускового розрядника, який необхідний для підключення до мережі, відноситься до класу енергоефективності А:

$$P \leq 0,15 \cdot \sqrt{F} + 0,0097 \cdot F, \quad (1.3)$$

ЛР і КЛЛ відноситься до класу енергоефективності А:

$$P \leq 0,24 \cdot \sqrt{F} + 0,0103 \cdot F, \quad (1.4)$$

У випадку, коли джерело світла не належить до класу А, тоді виконують розрахунок стандартної потужності P за допомогою формул (1.5-1.6).

$$P_R \leq 0,88 \cdot \sqrt{F} + 0,049 \cdot F, \text{ для } 34 \text{ лм} < F \leq 6500 \text{ лм}, \quad (1.5)$$

Після цього виконується розрахунок індексу енергоефективності, представленого в таблиці 1, що визначає клас енергоефективності від В до G. Таким чином, вважається, що важливим показником енергоефективності є споживана потужність.

Таблиця 1. - Класи енергоефективності ламп [12]

Індекс енергоефективності EEs	Клас енергоефективності ламп
$EEs < 60 \%$	В
$60 \% \leq EEs < 80 \%$	С
$80 \% \leq EEs < 95 \%$	Д
$95 \% \leq EEs < 110 \%$	Е
$110 \% \leq EEs < 130 \%$	F
$EEs \geq 130 \%$	G

Поява СДЛ на фоні зазначених параметрів обумовила спроби оцінки енергоефективності джерел світла за вартістю одиниці світлового потоку, розглядаючи його як відношення вартості до номінального світлового потоку (1.6) та як кількість люмен на гривню:

$$E_{\text{дс}} = C_{\text{дс}} / F_{\text{ном.}}, \text{ грн/лм} \quad (1.6)$$

При цьому зауважується, що вартість пускорегулювального апарата (драйвера), який є необхідним для роботи світлодіодів, та втрати потужності в ньому якимось чином не враховуються.

Існує значна кількість підходів, які враховують не лише номінальні електричні та світлотехнічні параметри, але й експлуатаційні аспекти. Ці

підходи охоплюють витрати на придбання як джерел світла, так і пускорегулюючих апаратів, а також включають в себе оплату рахунків за спожиту електроенергію та врахування впливу збурювальних факторів на електричні, світлотехнічні та експлуатаційні параметри тощо.

У Європі для визначення рівня енергоефективності використовується показник (Lighting Energy Numeric Indicator), який вимірюється в кВт×год/(м²×рік). Цей показник відображає щорічне споживання енергії, необхідне для операцій систем освітлення відповідно до специфікацій будівлі.

В Стандарт ЄС визначається річне споживання електроенергії освітлювальною системою будівлі за формулою:

$$LENI = W_{LIGHT} / S_{оп}, \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{м}^2 \times \text{рік}), \quad (1.7)$$

де $S_{оп}$ – розрахункова площа приміщення, м²,

W_{LIGHT} – річне споживання електроенергії лампами в будівлі.

Річне споживання електроенергії лампами в будівлі розраховується за формулою:

$$W_{LIGHT} = W_L + W_{пр}, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{рік}, \quad (1.8)$$

де,

$$W_L = \sum \{ (P_{\Sigma св} \cdot k_o) \cdot [(t_d \cdot k_{пл} \cdot k_d + (t_n \cdot k_o))] \} / 1000, \quad (1.9)$$

$$W_{пр} = \sum \{ \{ P_{пр} \cdot [\tau_p - (\tau_d + \tau_{нч})] \} + (P_{зр} \cdot \tau_{зр}) \} / 1000, \quad (1.10)$$

де $P_{св}$, $P_{пр}$ – загальна потужність робочих світильників та зарядних пристроїв для аварійних світильників у розглядуваній зоні відповідно;

$P_{пр}$ – паразитна потужність в зоні;

тд, тнч – тривалість роботи в денний і нічний час відповідно, год;

тр – стандартна тривалість року, $T_{\max} = P_{\text{зр}} = 8760$ год;

тзр – тривалість зарядки акумуляторів для світильників аварійного освітлення;

кд – коефіцієнт використання природного освітлення;

кпл – коефіцієнт присутності людей;

ко – коефіцієнт постійства освітленості;

Wпр – витрати енергії, обумовлені паразитною потужністю в режимі очікування і на аварійне освітлення,

Показник LENI дозволяє визначити ефективність використання енергії в освітлювальних установках і вказує на необхідність ефективного управління освітленням. Використання датчиків присутності і природного освітлення є важливим елементом.

Застосування систем управління сприяє кращому врахуванню потреб користувачів, забезпечуючи зменшення споживання енергії, при цьому якість освітлення може покращуватися. Таким чином, досягається баланс між сприйняттям освітлення людиною та енергоефективністю.

З наведеного випливає, що оцінка енергоефективності джерел світла в сучасному світі здійснюється різними країнами за різними підходами. Однак жоден із вже існуючих методів не є системним та науково обґрунтованим. Більшість підходів є однобічними і не враховують ключового аспекту – витрат грошей, які охоплюють не лише придбання джерел світла чи освітлювального обладнання, а й оплату за спожиту електроенергію освітлювальними установками.

Зазвичай дослідження обмежуються аналізом світлотехнічних або експлуатаційних факторів, частково враховуючи емоційні аспекти сприйняття світла людиною.

Таким чином, на сучасний момент навіть для джерел світла загального

призначення не існує узгодженої системи критеріїв для об'єктивного порівняння їхньої енергоефективності.

Метою наших подальших досліджень є розробка системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок, побудованих на їхній основі.

Висновки з розділу

1. Зазначено, що основою ефективної енергетичної стратегії нашого часу повинні бути: енергобезпека, енергоефективність, енергозбереження та екологія.

2. Навіть при значних досягненнях у світлотехніці, глобальний попит на штучне освітлення ще далекий від насичення. Тому необхідно створювати умови для активного впровадження високоефективних ДС.

3. Радикальне підвищення ефективності використання енергії в освітленні можливе за допомогою переходу на високоефективні ДС та впровадження інтелектуальних систем управління освітленням, що призведе до зниження загального споживання енергії.

4. Відсутність комплексних порівняльних досліджень характеристик ламп з різним типом світлодіодів сповільнює процес їх впровадження в освітленні.

5. Попри етапну заборону теплових джерел світла, їх обсяги продажу практично залишаються незмінними, що свідчить про зростання попиту на більш енергоефективні альтернативи.

6. Існуючі методи диммерування світлового потоку ДС не враховують вплив динаміки важливих параметрів, таких як електромагнітна сумісність, коефіцієнт потужності та пульсація світлового потоку, що іноді може призводити до сумнівів у їхній ефективності.

7. З появою напівпровідникових джерел світла, що відрізняються не лише високою світловою віддачею і тривалістю служби, але й великою вартістю, виникла необхідність у системному підході до оцінки енергоефективності освітлювальних систем, побудованих на їхній основі.

РОЗДІЛ 2

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

2.1 Сучасні проблеми енергоефективного освітлення

На глобальному ринку постійно з'являються нові типи джерел світла, освітлювальні пристрої та системи управління світловим потоком, призначені для внутрішнього та зовнішнього освітлення.

Один із ключових параметрів, що визначає енергоефективність освітлювальних установок, - це світлова віддача джерел світла, яка залежить від фізичних принципів їхньої роботи (теплові, розрядні або напівпровідникові), потужності, напруги мережі (низьковольтні чи високовольтні), режимів експлуатації та температури оточуючого середовища. Остання є критичною, зокрема, для люмінесцентних ламп та натрієвих ламп низького тиску. Теплові та розрядні лампи високого тиску нечутливі до коливань температури навколишнього середовища.

З іншого боку, напівпровідникові ДС (світлодіоди) особливо чутливі не лише до температури на р-п переході кристала, але й до збільшення температури оточуючого їхнього середовища в світильнику.

Цей фактор може значно вплинути на тривалість служби та продуктивність світлодіодів.

З урахуванням наведених параметрів та їх взаємозв'язку, а також розширення ринку освітлювальних технологій, стає очевидною необхідність у системному підході до оцінки енергоефективності освітлювальних систем, оснований на різних джерелах світла.

Такий підхід дозволить здійснювати обґрунтований вибір джерел світла та управління освітленням, максимально враховуючи якість освітлення та оптимальне використання електроенергії в різних умовах

експлуатації.

2.2 Дослідження рівня світловіддачі від потужності освітлювальних установок

Останні наукові дослідження та літературні джерела [4, 11, 17, 37] вказують на високий рівень деталізації інформації про фізичні принципи, розрахунок та конструкцію різноманітних джерел світла. Однак вони слабо охоплюють матеріал, пов'язаний з визначенням математичних залежностей між номінальними світловими віддачами та потужностями цих джерел. Розробка таких математичних моделей стане ключовою для прогнозування граничних значень світлових віддачі для як існуючих, так і перспективних джерел світла. Ці оцінки також дозволять визначити оптимальні потужності, які забезпечать ефективне дискретне регулювання світлового потоку, шляхом вимикання певної кількості ламп у певні години доби.

Дослідження, здійснене на основі аналізу каталожних даних провідних виробників світлотехніки, таких як PHILIPS та OSRAM, надало можливість встановити функціональні залежності між номінальними світловими віддачами та номінальними потужностями джерел світла. За отриманими даними були побудовані відповідні графічні залежності (рис. 2.1-2.5).

За аналізом графіків можна зазначити, що номінальні світлові віддачі джерел світла різних фізичних принципів дії, незалежно від їхнього типу, зростають за єдиною гіперболічною закономірністю при збільшенні номінальної потужності.

Переважає більшість джерел світла (рис. 2.1-2.5) виявляють збільшення світлових віддач при зростанні потужності.

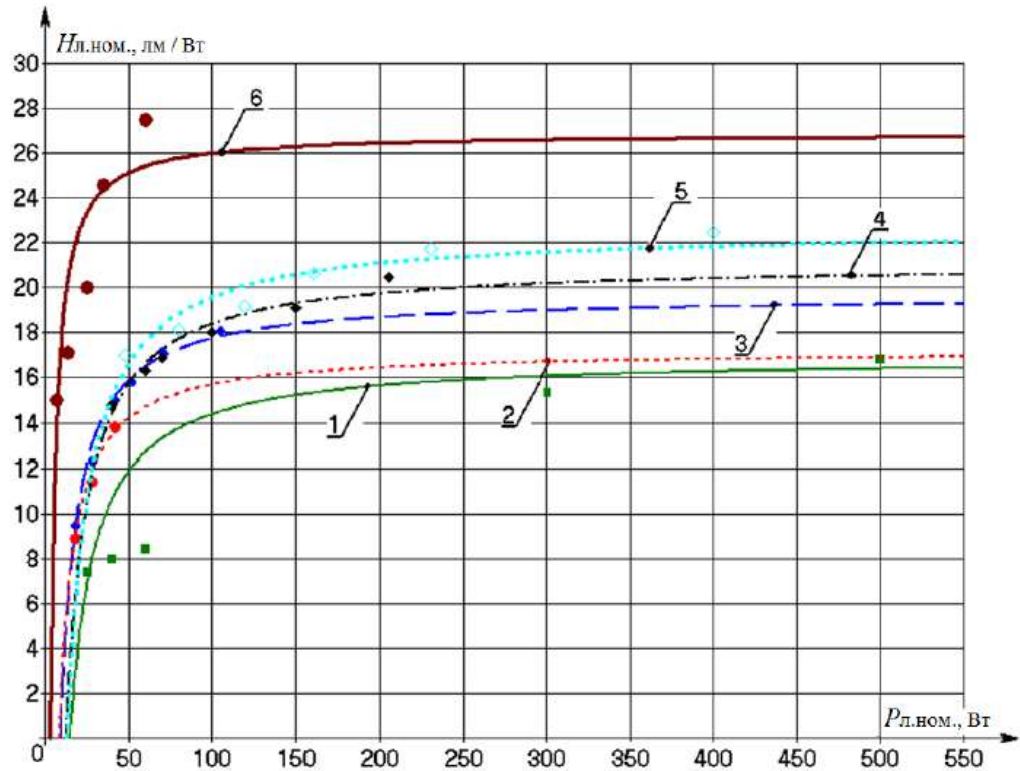


Рисунок 2.1- Зміна світловіддачі від потужності теплової лампи

1- ЛР, 2-6 - КГЛР

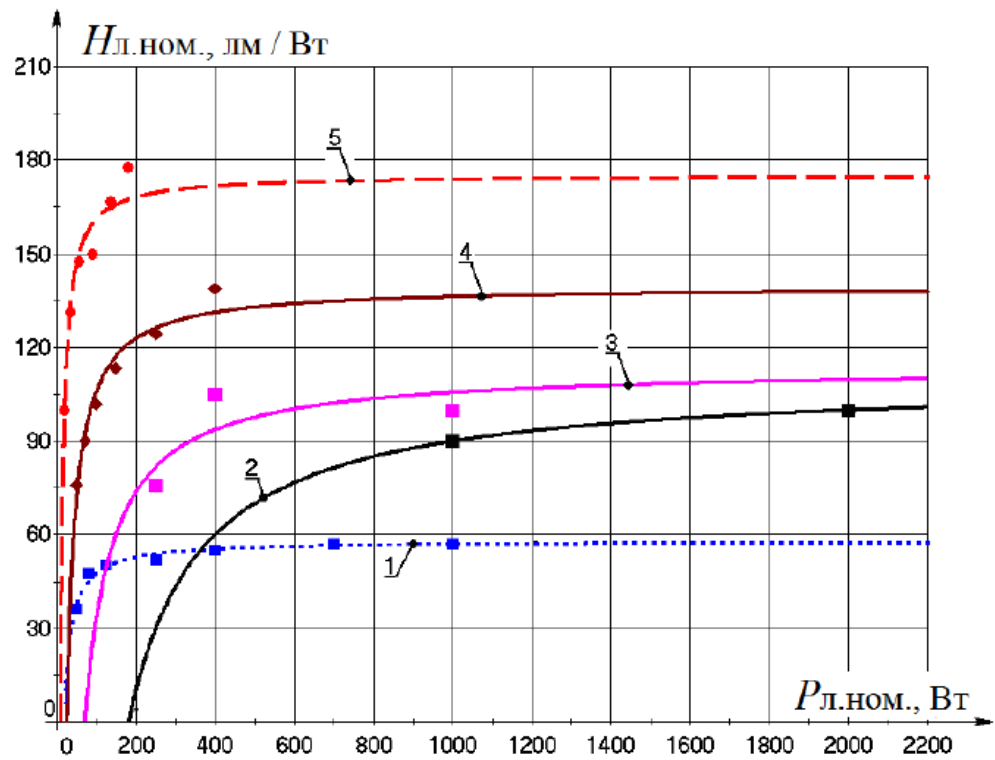


Рисунок 2.2- Зміна світловіддачі від потужності газорозрядної лампи

1-ДРЛ; 2, 3 – МГЛ; 4 – ДнаТ;

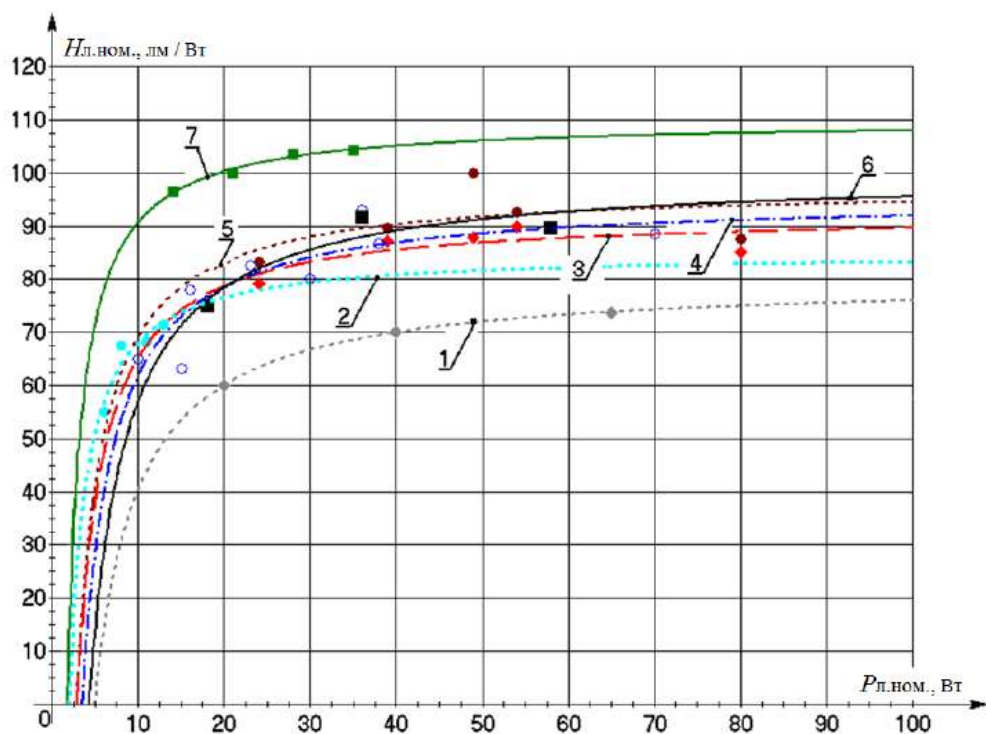


Рисунок 2.3- Зміна світловіддачі від потужності люмінесцентної лампи
1-ЛЛ(T12); 2 -ЛЛ(T2); 3-ЛЛ(T5); 4-ЛЛ(T8); 5-ЛЛ(T5); 6-ЛЛ(T8); 7-ЛЛ(T5);

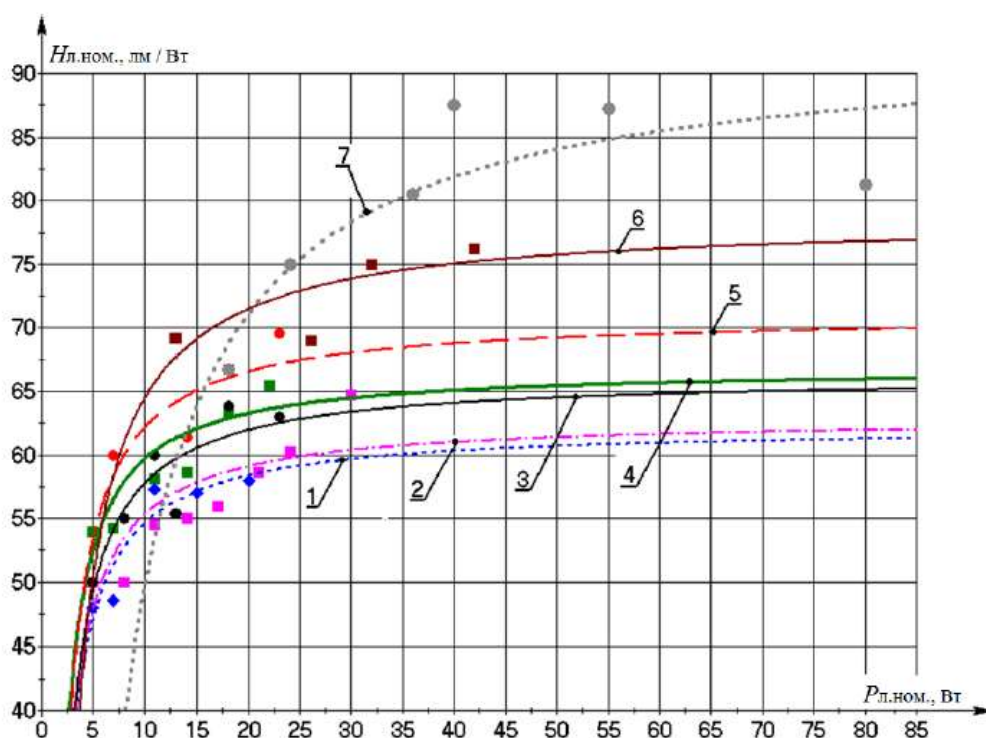


Рисунок 2.4- Зміна світловіддачі від потужності компактної люмінесцентної
лампи

1 – КЛЛ MINI; 2 – 6 канальні КЛЛ; 3 – спіральні КЛЛ; 4 – 6 канальні

КЛЛ; 5 – спіральні КЛЛ; 6 – КЛЛ з ЕПРА; 7 – КЛЛ 100 Вт

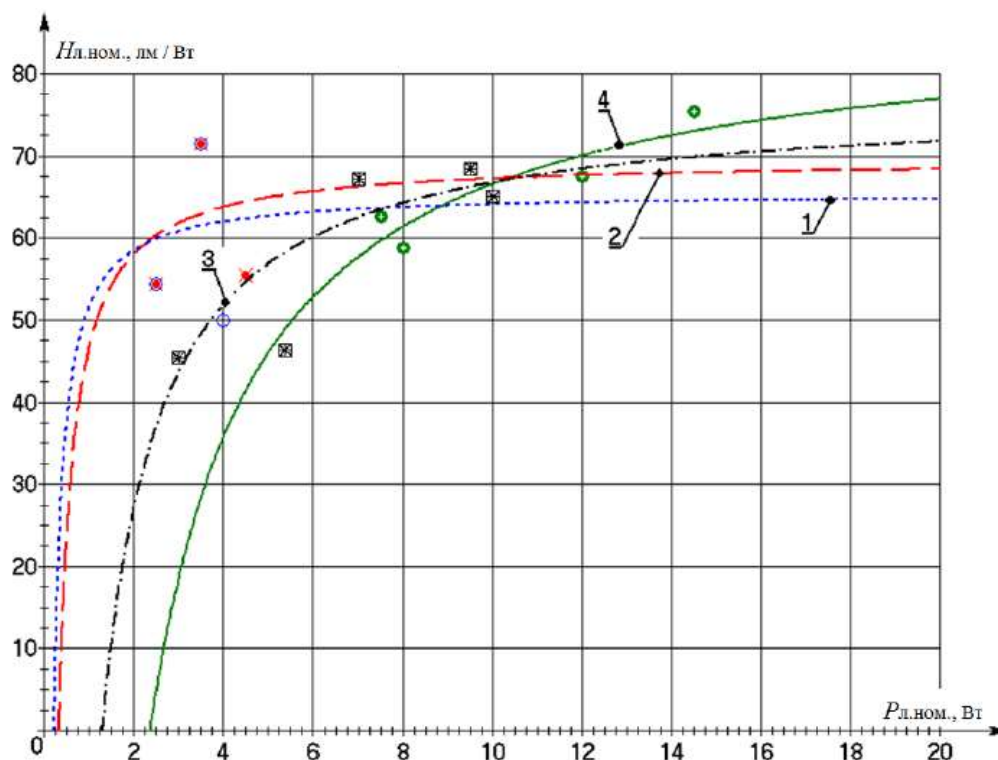


Рисунок 2.5- Зміна світловіддачі від потужності світлодіодної лампи

Традиційний підхід до підвищення ефективності ламп розжарювання, що базується на збільшенні температури вольфрамового тіла розжарення, вичерпав себе.

Прогрес у покращенні їхньої продуктивності можливий лише за умови переходу до напівпровідникових тіл розжарення, таких як тантал-карбідні та селективно-відбиваючі інфрачервоні плівки.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) для цих ламп може досягати 30%, що еквівалентно світловій віддачі 60-90 лм/Вт. Оскільки такі лампи не потребують струмообмежувальних баластів, що втрачають від 10% до 25% потужності лампи, і вони екологічно чисті, вони можуть конкурувати не лише з сучасними люмінесцентними лампами (ЛЛ), для яких обов'язковий стартовий баласт і токсичний ртуть, але й з деякими типами світлодіодних джерел світла, де підвищення ефективності є проблематичним (рис. 2.5,

крива 1).

Енергоефективність як світлодіодних ламп прямої заміни, так і світлодіодних світильників значно нижча, ніж у окремих світлодіодах. Це пояснюється неминучими втратами світлового потоку в світлодіодах, викликаними:

а) нагріванням кристалу світлодіода та додатковим тепловиділенням від драйвера 15 %;

б) втратами в оптичних елементах вторинної оптики (до 12% в лінзах з гладкою поверхнею; до 30% в лінзах з грубим світлорозсіювальним мікрорельєфом);

в) втратами в захисному склі до 15%.

На зниження загальної світлової віддачі також впливають втрати в драйвері до 10%. Таким чином, розробка світлодіодних світильників і світлодіодних джерел з ККД не менше 65 % виявляється складною задачею.

Також було виявлено, що низьке споживання електроенергії не завжди виключає наявність радіатора в світлодіодах. Дослідження показали, що середня тривалість роботи світлодіодів без радіатора не перевищує 1000 годин.

Особливо постає проблема відводу тепла у потужних світлодіодах. Використання потужних радіаторів помітно збільшує їхні розміри та вагу. Наприклад, світлодіодна лампа потужністю 10 Вт важить 200 г, у той час як КЛЛ потужністю 11 Вт, з таким самим світловим потоком, важить всього 60 г, а звичайна лампа розжарювання - 35 г. Необхідність використання радіаторів і особливість випромінювання світлодіодів в одну половину сфери (нижню) ускладнює створення на їхній основі джерел світла з розподілом світла, схожим на лампи розжарювання.

Щодо розрядних ламп високого тиску (рис. 2.2), вони ще мають певний потенціал для підвищення ефективності випромінювання стовпа розряду не лише через зменшення теплових втрат в об'ємі і на стінках

розрядної трубки, але й за рахунок перерозподілу енергії в спектрі випромінювання, яке спричиняє найбільшу чутливість людського ока. Дугові ртутні лампи з люмінофором (крива 1) вже повністю використали ці можливості. Тому не можна очікувати збільшення номінальних світлової віддачі при збільшенні номінальних потужностей цих ламп.

Обмежені можливості підвищення світлових показників при збільшенні потужності спостерігаються і в натрієвих лампах високого тиску, а в натрієвих лампах з низьким тиском цей показник майже вдвічі менше. Оскільки в лампах розжарення світло може конвертуватися до 44% електроенергії, їхня світловіддача при енергетичному еквіваленті білого світла в 330 лм/Вт. Це свідчить про наявність можливостей для підвищення світлової віддачі, навіть зі збільшенням потужності лампи.

Щодо можливостей підвищення світлових показників компактних люмінесцентних ламп у їхньому сучасному вигляді, для більшості типів ламп, їхні можливості майже вичерпані.

Проведений аналіз показав, що з графіків на рис. 2.1–2.6 складно визначити конкретні значення можливих змін (зростання або зменшення) світлових показників при збільшенні номінальної потужності лампи.

2.3 Дослідження світловіддачі ламп білого світла

Актуальність для розробників нових світлодіодних джерел світла полягає у визначенні максимально можливих значень світлового потоку і світлової віддачі в світлотехнічній продукції, що ґрунтується на використанні білих світлодіодів. Різні спеціалісти виробництва потужних білих світлодіодів роблять розрахунки, в результаті чого теоретичний максимум ефективності коливається близько 300 лм/Вт.

Оцінку якісних і кількісних характеристик джерел світла можна провести, керуючись лише кривою видності $V(\lambda)$, яка визначає ту частину випромінювання, що сприймається людським оком.

Ця нормована залежність встановлює чутливість $V(\lambda)$ при довжині хвилі випромінювання λ , що відповідає максимальній чутливості ока.

Спектральна чутливість ока для денного та нічного зору падає наведена на рис. 2.6.

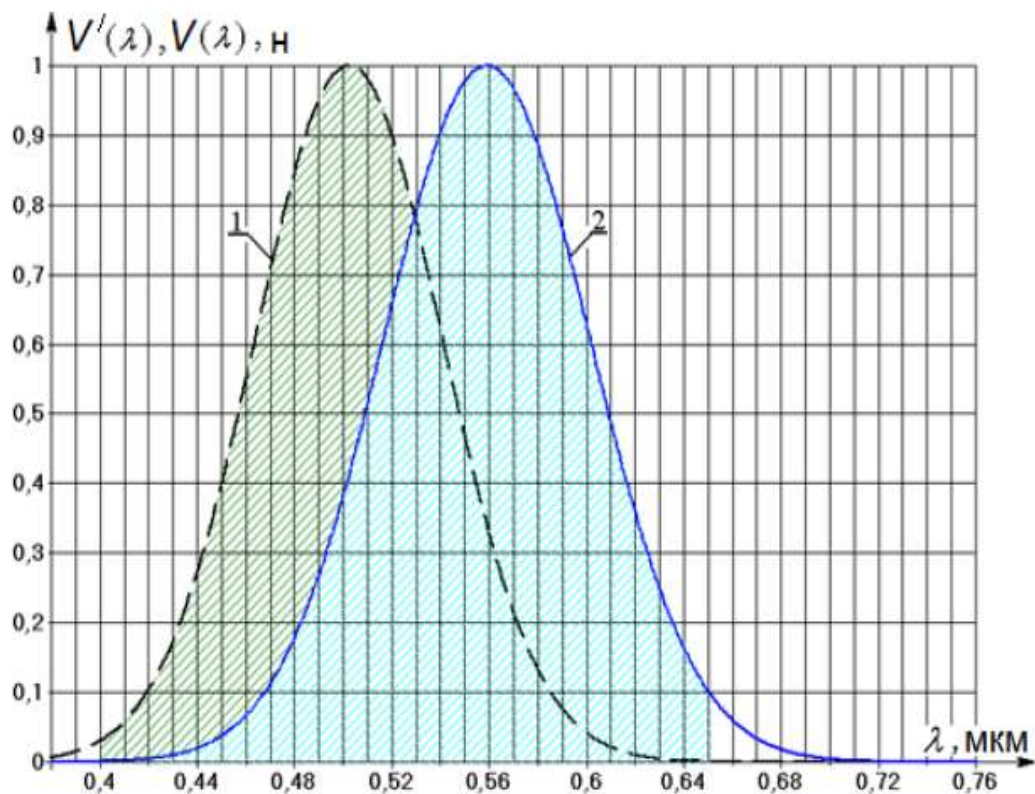


Рис. 2.6. Відносна спектральна чутливість людського ока:

1 – нічний режим освітленості; 2 – денний режим
освітленості

Світловий потік світлодіоду можна визначити як суму елементарних світлових потоків всіх його монохроматичних складових:

$$F = K_{\max} \cdot \int V(\lambda) \cdot P_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (2.1)$$

Отже, площа, що обмежується кривою усередненої спектральної чутливості ока, та віссю абсцис, пропорційна світловому потоку, може служити мірою світлового випромінювання.

Виражаючи світловий потік у світлових Вт, можна зазначити, що один світловий Вт еквівалентний 683 лм/Вт при $\lambda=0,555$ мкм. Це залишається справжнім лише в умовах збереження спектрального складу випромінювання та спектральної чутливості ока.

Криві видимості для денного у діапазоні довжин хвиль від 0,380-0,760 мкм можна визначити :

$$- T_K = 2000 - 5475 K : V_{\text{гаус.д2}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,559}{0,060283} \right)^2 \right], \quad (2.2)$$

$$- T_K = 5475 - 9000 K : V_{\text{гаус.д1}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,559}{0,06024} \right)^2 \right]; \quad (2.3)$$

Криві видимості нічного зору у діапазоні довжин хвиль від 0,380 до 0,760 мкм можна визначити:

$$- T_K = 2000 - 3250 K : V_{\text{гаус.нч1}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,5025}{0,05464} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

$$- T_K = 3250 - 9000 K : V_{\text{гаус.нч2}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,5025}{0,05475} \right)^2 \right]. \quad (2.5)$$

Результати обчислень за формулами 2.2-2.3, на основі яких побудовано відповідні графіки, що представлені на рис. 2.7. Отримані залежності ефективно апроксимуються рівняннями:

Для денного зору:

$$H = 3332,654 \cdot \Delta\lambda^2 - 2804,359 \cdot \Delta\lambda + 779,888, \text{ лм/Вт},$$

Для нічного зору:

$$H = 4164,634 \cdot \Delta\lambda^2 - 3157,568 \cdot \Delta\lambda + 792,842, \text{ лм/Вт}.$$

Проведений аналіз виявив, що при симетричному скороченні діапазону електромагнітних випромінювань світлова віддача збільшується. Враховуючи зменшення індексу кольоропередачі світловіддача досягає свого піку у 683 лм/Вт, що є характерним для монохроматичного випромінювання.

Залежність світлової віддачі від типу обраного світлодіоду у видимій області спектру представлена на графіку (рис. 2.7)

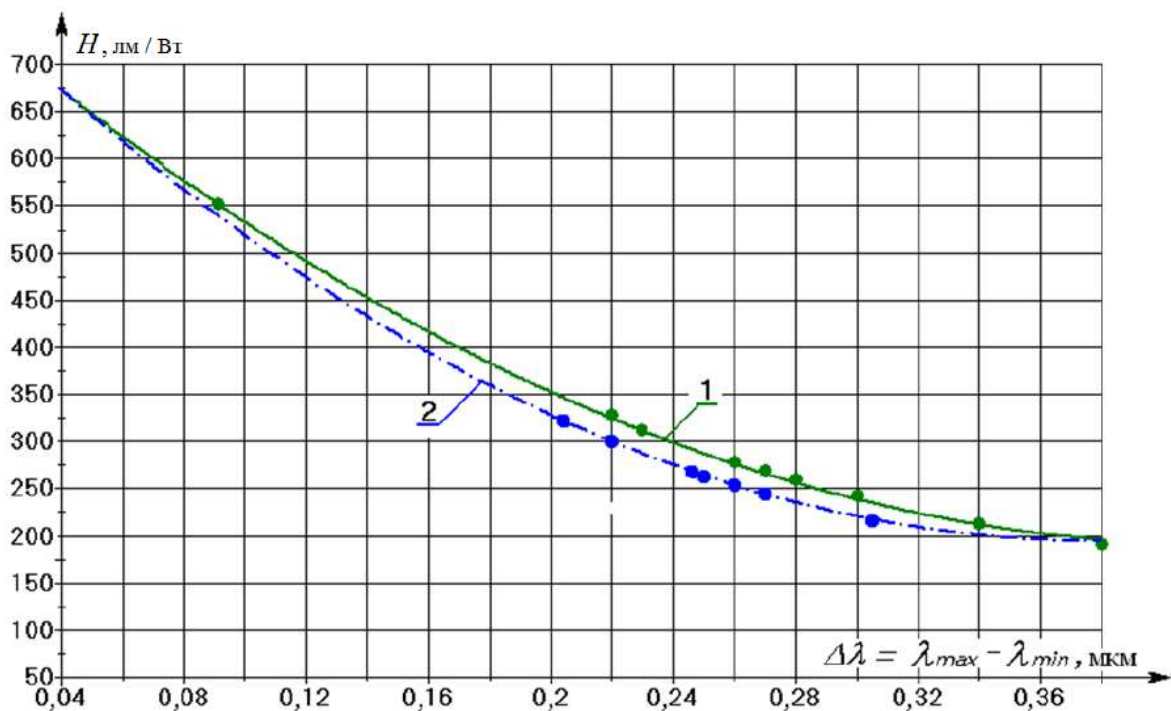


Рисунок – 2.7. Залежність світлової віддачі від типу обраного світлодіоду у видимій області спектр:

1 – вдень 2 – вночі.

Світлові властивості реальних світлодіодів виявляться меншими, ніж видно на рис. 2.7, через не ідеальність спектрального складу світлодіодів.

Для їх повного заповнення буде необхідно використовувати більші потужності, що призведе до зниження світлових характеристик.

При використанні світлодіодів з випромінюванням у діапазоні (0,457...0,548) мкм, що призводить до повної втрати фіолетового, жовто-зеленого, жовтого, рожевого і червоного випромінювання, світлова віддача, оптимізована для нічних умов, становить 453 лм/Вт, а для денних умов – 302 лм/Вт.

Висновки з розділу

1. Встановлено, що при збільшенні номінальної потужності для більшості джерел світла ця залежність є зростаючою, але за трьома різними принципами дії. Це свідчить про те, що отримані значення світлової віддачі для трубчастих ЛР і МГЛ є максимальними і не змінюються при подальшому збільшенні потужності, а для безелектродних ЛЛ подальше збільшення потужності призводить до зменшення світлової віддачі.

2. Отримано аналітичні вирази для функціональних залежностей між номінальною світловою віддачою і номінальною потужністю для всіх існуючих джерел світла.

3. Запропоновано методику для конкретизації можливих змін номінальних світлової віддачі при зростанні номінальної потужності джерела світла.

4. Доведено, що світлова віддача для джерел світла не білого кольору зростає. Реальні значення світлової віддачі для джерел білого світла з високим індексом кольоропередачі ($R_a \geq 93$) ростуть до 131 лм/Вт.

5. Отримано аналітичні вирази для визначення світлової віддачі джерел білого світла у вибраному діапазоні електромагнітного випромінювання у видимій області спектру для денного і нічного зору, що дозволяє визначати візуальну ефективність джерела світла.

РОЗДІЛ 3

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В РІЗНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

3.1 Дослідження світлового потоку в процесі експлуатації

Під час використання джерел світла спостерігається поступове зменшення світлового потоку внаслідок різних факторів. В розрядних лампах високого і низького тиску цей процес особливо активний протягом перших 100 годин світіння через деактивацію катодів, виділення та поглинання домішок.

Подальше зменшення швидкості падіння світлового потоку відзначається у твердотільних джерелах світла спад світлового потоку пов'язаний лише із зменшенням діаметра тіла розжарювання і розсіювання вольфраму, а у напівпровідникових - з температурою р-п переходу.

Незалежно від причин спаду світлового потоку під час експлуатації, його значення після середньої тривалості світіння повинно залишатися не менше 70% від номінальних значень, визначених у нормативно-технічній документації.

На сьогоднішній день мінімальний спад світлового потоку під час середньої тривалості світіння в сучасних лампах не перевищує 5%, а в безелектродних - 50%.

Якщо враховувати світлову енергію для оцінки енергоефективності, необхідно мати аналітичні залежності динаміки світлового потоку джерел світла протягом експлуатації.

Аналіз існуючих та власних досліджень вказує на те, що ці залежності, якщо вони нормовані, тотожні для різних типів джерел світла і мають форму, яка представлена на рис. 3.1.

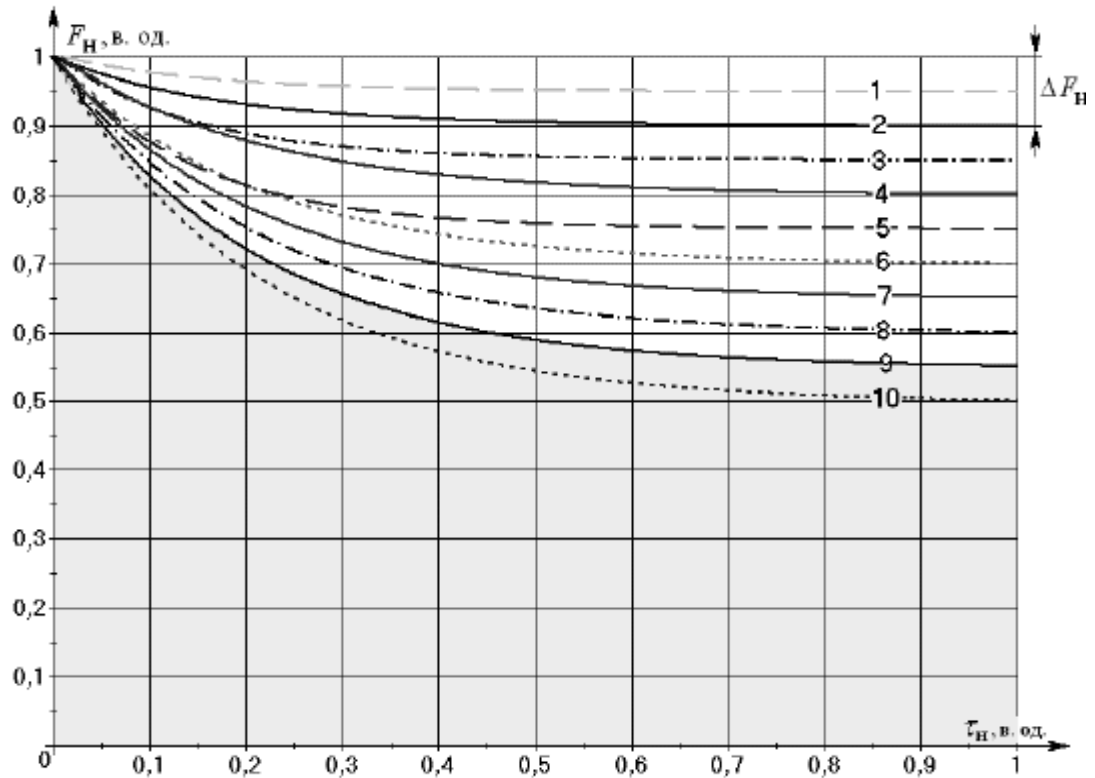


Рис. 3.1. Зміна світлового потоку ламп в процесі експлуатації

Для визначення розміру площі спаду світлового потоку необхідно знати функціональні залежності, що описують динаміку світлового потоку протягом експлуатації ламп.

Світлова енергія від лампи визначається за формулою:

$$Q_{\text{дс}} = \int_0^{\tau_{\text{ном}}} F(t) dt, \quad (3.1)$$

де $F(t)$ – залежність зміни світлового потоку в процесі експлуатації лампи;
 $\tau_{\text{ном}}$ – усереднений номінальний час світіння лампи, год.

Графічні представлення для різних видів ламп, зазвичай, апроксимуються поліномами третього ступеня, експоненціальними і показниковими функціями. Оскільки при переході до нормованих значень

динаміки перехідного процесу світлового потоку в процесі експлуатації визначається остаточно нормованим спадом і ефективно описується за допомогою суми експоненціальних функцій з різними константами часу та константами інтегрування:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = (F_{\text{н.ном}} - \Delta F_{\text{н}}) + \Delta F_{\text{н}} \cdot \exp(-t_{\text{н}} / \tau_1) - \Delta F_{\text{н2}} \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / \tau_2)) \quad (3.2)$$

де $F_{\text{н}}(t_{\text{н}})$ – нормований світловий потік лампи;

$F_{\text{н.ном}}$ – нормоване значення номінального світловий потік лампи;

$F_{\text{н}}$ – нормоване значення світлового потоку;

$\Delta F_{\text{н}}$ – світловий потік перехідного процесу падіння світлового потоку лампи від початку експлуатації;

$t_{\text{н}}$ – нормативне значення терміну роботи;

За такого підходу для різних кінцевих нормованих величин спаду світлового потоку $\Delta F_{\text{н}}$ для будь-якої лампи, згідно рис. 3.1., можна визначити:

Для кривої 1:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,95 + 0,05 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,154) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 2)),$$

Для кривої 2:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,90 + 0,10 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,164) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 2)),$$

Для кривої 3:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,85 + 0,15 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,145) - 0,002 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,2)),$$

Для кривої 4:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,80 + 0,20 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 2)),$$

Для кривої 5:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,75 + 0,25 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,145) - 0,002 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,2)),$$

Для кривої 6:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,70 + 0,30 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 2)),$$

Для кривої 7:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,65 + 0,35 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)),$$

Для кривої 8:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,55 + 0,45 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)),$$

Для кривої 9:

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,50 + 0,50 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)).$$

Отримані апроксимовані вирази надають можливість визначати нормовані значення світлової енергії $Q_{\text{н.дс}}$, яку генерують лампи, враховуючи різні кінцеві значення нормованого спаду світлового потоку $\Delta F_{\text{н}}$. Це можна зробити за допомогою наступної формули:

$$Q_{\text{н.дс}} = \int_0^1 F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) dt_{\text{н}}, \text{ в. од.} \quad (3.3)$$

Для переходу до конкретних фізичних величин необхідно помножити нормовані значення світлових енергій на добуток номінальних значень тривалості світіння (в годинах) і світлового потоку (в мільйонах люмен), специфічного для розглядуваного джерела світла. Похибка при використанні такого підходу не перевищує 8%.

3.2 Дослідження експлуатаційних характеристик світлодіодних ламп

Основною різницею між світлодіодними (СДЛ) та традиційними є використання абсолютно іншого механізму для генерації світла, а саме виникнення квантів світлової енергії під час рекомбінації електронно-діркових пар у р-п переході. У цьому випадку корпус, лінзи, радіатор і драйвер є необхідними складовими джерела світла.

Для ефективного відведення надлишкової теплової енергії потрібно мати радіатор вагою до 100 грамів та забезпечити низькі теплові опори в місцях контактів.

Невідповідність цим вимогам може призвести до надмірного підвищення температури р-п переходу, що безпосередньо впливає на ключові параметри енергоефективності світлодіодних пристроїв, такі як тривалість світіння, зміна і стабільність світлового потоку під час роботи, надійність та споживана потужність.

Основною математичною моделлю напівпровідникових діодів є модель Еберса-Молла, що дозволяє будувати ампер-вольтні характеристики цих діодів.

Вольт-амперна характеристика СДЛ є нелінійною, і діод починає проводити струм при певній пороговій напрузі, яка визначає матеріал напівпровідника. Оскільки світлодіоди, що відносяться до діодів з товстою базою, виготовляються з матеріалів з великою шириною забороненої зони,

то опір бази можна розглядати як сталий і незалежний від струму.

Таким чином, ампер-вольтні характеристики напівпровідникових діодів з товстою базою можна представити у вигляді експоненціальних рівнянь, якщо врахувати експоненціальну залежність граничної концентрації неосновних носіїв біля р-п переходу від напруги.

Але у більшості сценаріїв, коли напруга на р-п переході наближається до значень контактної різниці потенціалів, опір бази не залишається постійним при зміні струму. Це призводить до відхилення вольт-амперної характеристики від експоненціального закону, ускладнюючи процес визначення реальної динаміки їхньої зміни.

Така ситуація змушує дослідників використовувати експериментальні методи для визначення цих закономірностей та встановлення відмінностей у електричних і світлотехнічних характеристиках світлодіодів із структурою р-п від аналогічних параметрів у традиційних джерел світла.

У більшості публікацій вольт-амперні характеристики звичайних напівпровідникових діодів та світлодіодів часто називають вольт-амперними характеристиками.

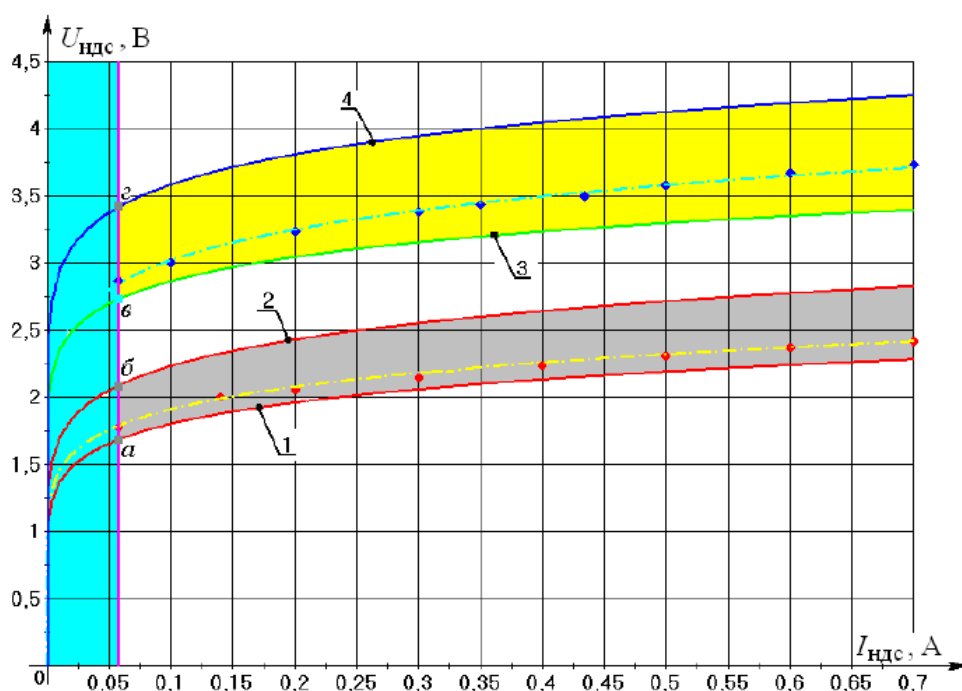


Рисунок 3.2. Вольт-амперні характеристики різних типів світлодіодів

Всі наведені залежності для кривих 1-9 на рис. 3.1. є нормованими, і всі експерименти проводилися за однаковими умовами. Для забезпечення відтворюваності результатів кількість досліджуваних світлодіодів у кожній з розглянутих груп була рівною шести відповідно до статистичного G-критерію Кохрена.

Дослідження даних щодо форми вольт-амперних характеристик (ВАХ) білих і різнокольорових світлодіодів, підтверджує (рис. 3.2), що траєкторії цих характеристик помітно відрізняються в залежності від колірної гами випромінювання. Це пояснюється тим, що такі світлодіоди виготовляються з використанням різних напівпровідникових матеріалів, що призводить до різниці у ширині забороненої зони та, відповідно, у висоті потенціального бар'єру на p-n переході.

Для стимулювання прямого струму необхідно зменшити висоту потенціального бар'єру, прикладаючи пряму напругу, що наближена до контактної різниці потенціалів до p-n переходу. Ця напруга визначає розмір нечутливої зони, відомої як порогова напруга. Починаючи з моменту досягнення порогової напруги, струм починає стрімко зростати. У p-n переході на основі германію $k = (0,3...0,4)$ В, на основі кремнію $k = (0,6...0,8)$ В, і в СДЛ k залежить від кольору випромінювання, що представлено точками а, б, в, г на рис. 3.2. ВАХ червоних і жовтих світлодіодів обмежені першою зоною, обведеною кривими 1 і 2, тоді як ВАХ зелених, голубих, синіх і білих світлодіодів зосереджені в другій зоні, обведеної кривими 3 і 4.

З аналізу графіків рис. 3.3, що побудовані на основі результатів експериментів, випливає, що в теплових джерелах світла зростаючою є не лише вольт-амперна характеристика (крива 3), але і диференціальний (крива б) та статичний (крива 9) опори.

Це свідчить про те, що ці джерела можна підключати до мережі без будь-якої пускорегулювальної апаратури і просто регулювати світловий

потік від максимально можливого значення до нуля.

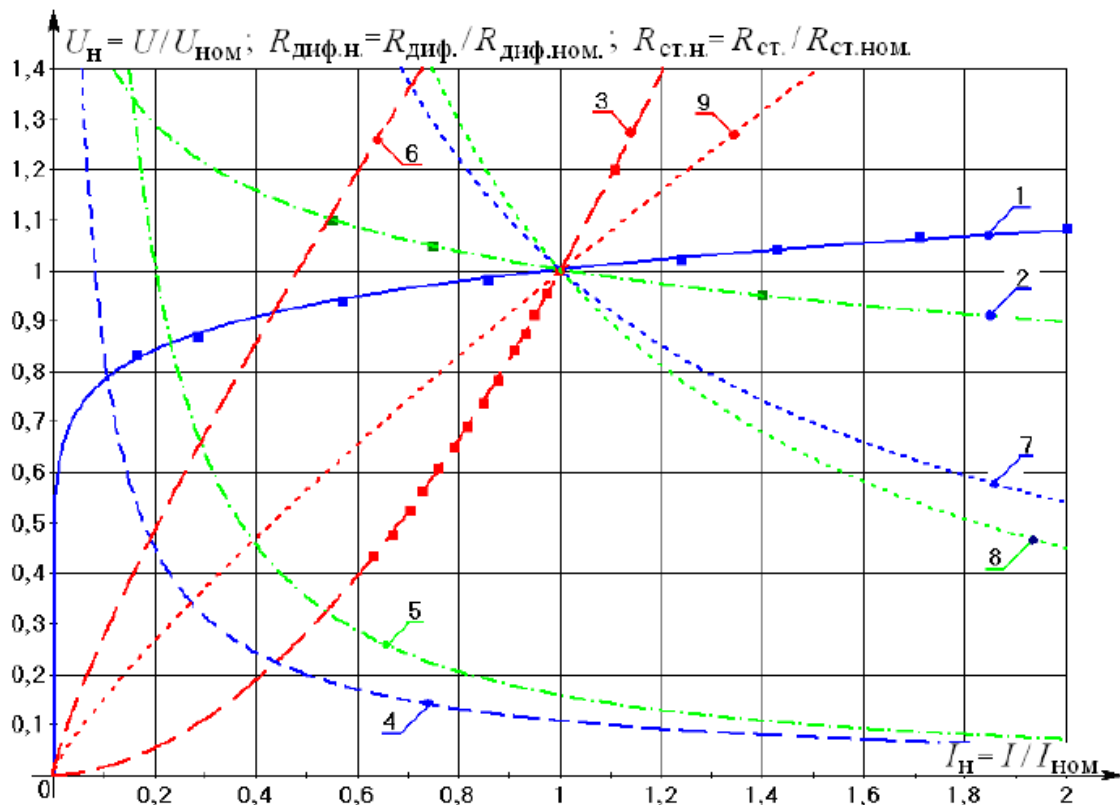


Рисунок 3.3- Вольт-амперні характеристики ламп

1- СДЛ; 2-ДРЛ; 3-ЛР

Проте максимальне значення не повинно перевищувати номінальне більше, ніж вдвічі, через руйнівний вплив перевантажень протягом періоду служби. Наприклад, при живленні теплових джерел світла (ЛР) напругою, яка перевищує її номінальне значення на 20%, термін служби може скоротитися більше, ніж в 10 разів.

Регулювання інтенсивності світлового випромінювання в широких межах, від максимального рівня до значень, що в п'ять разів менше від номінальних, можливе лише для розрядних ламп низького тиску. Це реалізується за допомогою спеціальних схем, які забезпечують підтримання напруги на номінальному рівні та постійне нагрівання катодів люмінесцентних ламп для забезпечення високої термоелектронної емісії з

них при зменшенні розрядного струму.

Регулювання світлового потоку в розрядних лампах високого тиску є більш складним завданням через значну відмінність у конструкції електродів порівняно з люмінесцентними лампами. У розрядних лампах високого тиску електроди мають одноштиркову конфігурацію, що виключає можливість забезпечення високої термоелектронної емісії з катодів за допомогою їх підігрівання зовнішнім джерелом енергії під час регулювання світлового потоку. Таким чином, глибина регулювання світлового потоку у розрядних лампах високого тиску, зокрема у лампах типу ДРІ і ДРЛ, не часто перевищує 35%, і часто супроводжується акустичним резонансом, за винятком ламп типу ДНаТ, які легко запалюються і стабільно працюють при димеруванні до 60%.

У характеристиці вольт-ампер та всіх інших функцій для СДЛ, зокрема крива 1 на рис. 3.3 та всі відображені на рис. 3.2 графіки, спостерігається зростання, але знаходиться в беззмінній зоні від 0,0 до 0,6 на вісі ординат (напруги). Диференціальний опір (крива 4) та статичний опір (крива 7) є додатними та зменшуються за гіперболічним законом при збільшенні струму. Отже, для їхньої ефективної роботи необхідні стабільні джерела живлення (драйвери). Оскільки в околі номінальних значень електричних параметрів СДЛ навіть одно відсоткове зміщення напруги живлення призводить до десяти відсоткової зміни струму, драйвери повинні функціонувати як стабілізатори струму, а не напруги.

Аналіз експериментальних даних також вказує на те, що прямі вольт-амперні характеристики (залежності 1 – 4 на рис. 3.2) для всіх СДЛ відрізняються від відповідних характеристик звичайних напівпровідникових діодів і ефективно описуються ступеневими функціями.

Напруга СДЛ:

$$U = R_{\text{ном}} \cdot I^{\beta}, \quad (3.4)$$

Струм СДЛ:

$$I = G_{\text{ном}} \cdot U^{\alpha}, \quad (3.5)$$

$G_{\text{ном}}$ – номінальна провідність СДЛ;

α, β – значення, які визначають крутизну ВАХ в залежності від довжини хвилі випромінювання СДЛ. Результати розрахунків, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Розрахункові параметри світлодіодів

Колір СДЛ	Кое- фіцієнт α	Кое- фіцієнт β	Напруга на СДЛ, В	Струм СДЛ, А	$R_{\text{ном}}$	$G_{\text{ном}}$
Блакитний	10,843	0,092	3,2-4,0 (3,45)	0,35	3,800	$(5,158 \cdot 10^{-7})$
Жовтий	9,1620	0,109	2,1-2,6 (2,36)	0,35	2,646	$(1,341 \cdot 10^{-4})$
Зелений	11,414	0,087	3,2-4,0 (3,25)	0,35	3,563	$(5,028 \cdot 10^{-7})$
Помаранчевий	8,9470	0,112	2,1-2,6 (2,28)	0,35	2,564	$(2,196 \cdot 10^{-4})$
Синій	10,774	0,093	3,2-4,0 (3,50)	0,35	3,858	$(4,811 \cdot 10^{-7})$
Фіолетовий	10,572	0,095	3,2-4,0 (3,60)	0,35	3,976	$(4,600 \cdot 10^{-7})$
Червоний	8,2470	0,121	2,1-2,6 (2,22)	0,35	2,520	$(4,872 \cdot 10^{-4})$

У прямому напрямку світлодіоди активуються, в той час як у зворотному напрямку вони залишаються вимкнутими. Таким чином, зворотні вітки вольт-амперних характеристик напівпровідникових джерел світла, хоч і не розглядаються при проектуванні драйверів, враховують, що пробивні зворотні напруги мають невеликі значення, не перевищуючи 5 В.

Можливість використання аналітичних виразів (3.4) і (3.5) відкриває можливість отримання формул для розрахунку всіх електричних характеристик напівпровідникових джерел світла при будь-яких

передбачуваних значеннях напруг і струмів.

Найвищі світлові віддачі у СДЛ спостерігаються при невеликих струмах (крива 6 на рис. 3.20). Поступове збільшення струму призводить до падіння світлової віддачі, причому цей спад відбувається з відсутністю стрімкості та наближається до лінійного закону.

У порівнянні з ЛР, де як світлова віддача, так і світловий потік нелінійно зростають із збільшенням струму, у СДЛ спостерігається інший характер залежності.

У люмінесцентних лампах максимальні світлові віддачі досягаються при номінальних значеннях струму, і будь-яке перевищення цього значення призводить до падіння світлової віддачі. Рисунок 3.4 надає відображення зазначених залежностей електричних та світлотехнічних параметрів СДЛ та ЛР від робочих значень струму.

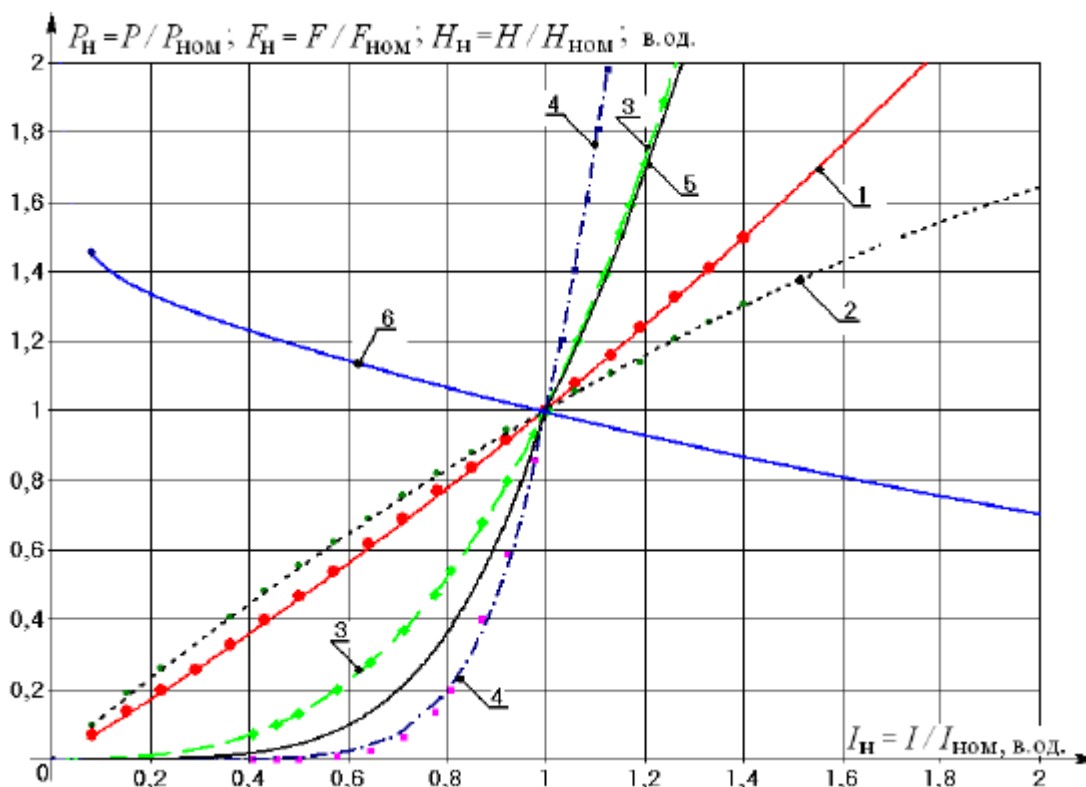


Рисунок 3.4. Значення потужності світлодіоду (1,3), світлового потоку світлодіоду (2,4) та світлової віддачі (5,6) ЛР та СДЛ в робочих умовах

Регулювання світлового потоку СДЛ здійснюється з такою ж легкістю, як і у випадку ЛР. Межі регулювання виявляються найширшими серед інших відомих джерел світла, охоплюючи діапазон від 1,6 від номінального значення при подвоєному струмі до повного вимкнення (крива 2 на рис. 3.4).

Отримані залежності добре апроксимуються наступними математичними виразами:

Номінальна потужність СДЛ:

$$P_{\text{н}} = 0,16 \cdot I_{\text{н}}^2 + 0,85 \cdot I_{\text{н}} + 0,05 \quad (3.6)$$

Номінальна потужність ЛР:

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{2,95}, \text{ для } 0 \leq I_{\text{н}} \leq 1,2 \quad (3.7)$$

З виразів (3.6-3.7), видно пряма залежність від значення номінального струму, надаючи їм універсальність для визначення відповідних характеристик драйверів і розрахунку режимів кінцевих комутаційних пристроїв, що використовують світлодіоди.

Зазначимо, що значення номінального струму відіграє ключову роль. Таким чином, для визначення оптимального значення номінального струму, яке використовується в світлотехнічних виробках з метою забезпечення потрібного рівня світлового потоку, ми провели дослідження динаміки перехідних процесів, таких як зростання температури на кристалах світлодіодів та спад світлового потоку виробу від моменту ввімкнення до досягнення усталеного режиму.

Розгляд даних виявив, що при зменшенні світлового потоку під час перехідного процесу від ввімкнення до досягнення усталеного стану на понад 10%, температура р-п переходу світлодіодного джерела світла

перевищує припустимі значення. Це активізує деградацію параметрів пристрою, включаючи термін його служби. Зниження світлового потоку на більше як 10%, при температурі корпусу близько 65°C і вище, вимагає обережного відношення до визначеного виробником терміну експлуатації світлотехнічного пристрою.

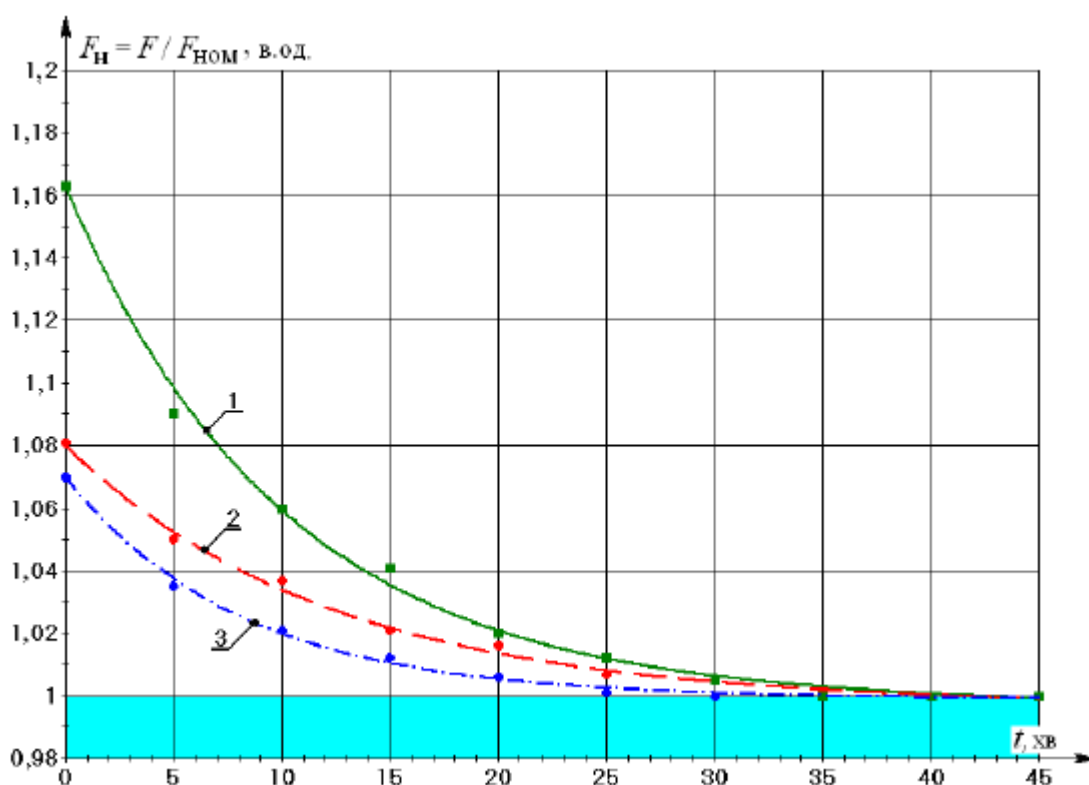


Рисунок - 3.5. Падіння світлового потоку під час перехідного процесу для різних типів СДЛ

В процесі вивчення графіків (рис. 3.5) стало зрозуміло, що динаміка перехідного процесу, що характеризує спад нормованого світлового потоку світлодіода від моменту включення до досягнення усталеного стану, ефективно виражається залежністю:

$$F_n = 1 + a \cdot \exp(-t/\tau_1) - b \cdot [1 - \exp(-t/\tau_2)], \quad (3.8)$$

де a - початкове нормоване значення світлового потоку СДЛ при кімнатній температурі р-п переходу у момент включення в електричну мережу (стала інтегрування першого перехідного процесу); b - динаміка перехідного процесу зменшення світлового потоку СДЛ від моменту ввімкнення до досягнення усталеного стану (стала інтегрування другого перехідного процесу); τ_1, τ_2 – сталі часу компонентів перехідного процесу зменшення світлового потоку СДЛ від моменту ввімкнення до досягнення усталеного стану; t – тривалість роботи, в хвиликах.

З формули (3.8) можна зробити висновок, що динаміка процесу охолодження р-п переходу охоплює два аналогічні процеси. Перший з них залежить від теплового опору між основою світлодіоду (алюмінієвою або мідною) та радіатором, а другий — від теплового опору між радіатором та навколишнім середовищем. Перший опір можна зменшити, використовуючи теплопровідні пасти різних типів між основою світлодіодів та поверхнею радіатора, тоді як другий можна покращити, застосовуючи більш ефективні радіатори, такі як теплові труби, вентиляція вентиляторами та вибір оптимальної конфігурації.

З вищеприведеного випливає, що для визначення оптимального значення номінального струму у виробках світлотехніки, розроблених на основі світлодіодів, з точки зору забезпечення необхідного терміну служби, необхідно аналізувати динаміку перехідного процесу спаду світлового потоку для принаймні п'яти значень струму, які рівномірно розташовані у рекомендованому діапазоні, зазначеному в нормативно-технічній документації. З отриманих даних слід побудувати графік залежності відносного спаду світлового потоку від струму та обрати значення струму, при якому спад світлового потоку не перевищує 10%. Саме це значення струму слід вважати номінальним.

Дослідження взаємозв'язку між прямим падінням напруги та довжиною хвилі максимуму випромінювання світлодіодів (СДЛ) на рис. 3.6 вказує на те, що сучасні технології не гарантують виробництва світлодіодів з недвозначно стабільними параметрами, навіть у межах однієї партії.

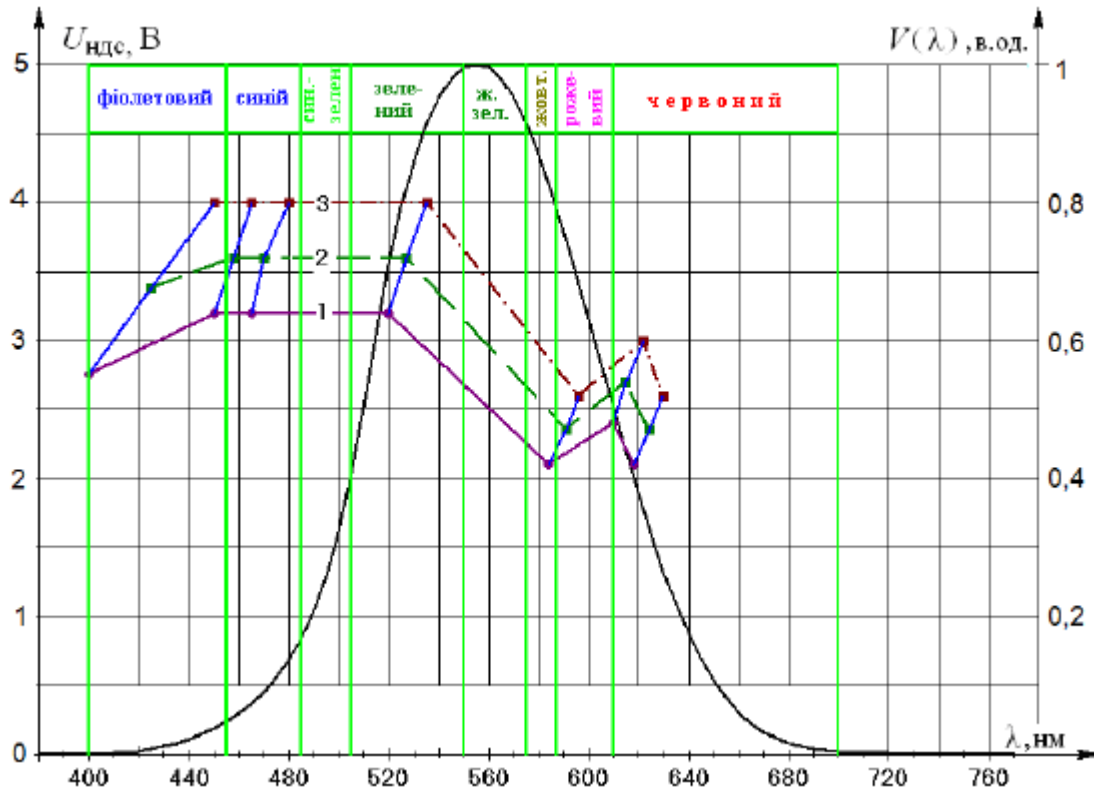


Рисунок 3.6 - Залежність падіння напруги на світлодіоді від довжини хвилі максимуму випромінювання СДЛ

Значні розходження від типових значень прямого падіння напруги, довжини хвилі та сили світла для певних кутів випромінювання змушують підприємства проводити сортування світлодіодів за параметрами, такими як напруга, колірна температура, світловий потік, яскравість, сила світла та індекс передачі кольору, що може призводити до зростання вартості кінцевої продукції.

Висновки з розділу

1. Встановлено функціональні залежності динаміки світлового потоку від джерел світла під час експлуатації, що дає змогу визначати обсяг світлової енергії, створеної за будь-який наперед визначений проміжок часу.

2. Проведено експеримент, який підтверджує, що лише лампи типу ДНаТ серед розрядних ламп високого тиску можна рекомендувати для використання в схемах регулювання світлового потоку.

3. Доведено, що зниження світлового потоку під час перехідного процесу від моменту включення до переходу в усталений режим в межах до 10% свідчить про те, що при такому тепловому режимі світлотехнічного виробу середній термін служби світлодіодів буде приблизно рівним заявленому в нормативно-технічній документації номінальному значенню. Вище 10% зменшення світлового потоку свідчить про надмірний перегрів р-п переходу світлодіодів, що веде до зниження світлової віддачі та середнього терміну служби нижче визначених виробником значень.

4. Розроблено методику визначення оптимального значення номінального струму для світлодіодів світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння. Це здійснено через вивчення залежності відносного зменшення світлового потоку від струму від моменту включення до переходу в усталений режим, що запобігає розробці та виробництву низькоякісної продукції.

РОЗДІЛ 4

4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

4.1 Оцінка енергоефективності джерел світла

Проблема енергоефективності набуває загальносвітового значення та визначає майбутнє людської цивілізації. З одного боку, це пов'язано із вичерпанням паливно-енергетичних ресурсів, а з іншого – з забрудненням навколишнього середовища викидами шкідливих речовин у атмосферу. Таким чином, раціональне використання електроенергії та зниження витрат на штучне освітлення стають ключовими завданнями глобальної політики.

Для досягнення цих цілей необхідно забезпечити системну, науково-обґрунтовану оцінку енергоефективності джерел світла (ДС) та освітлювальних установок (ОУ). Зазначена оцінка має ґрунтуватися на комплексі показників, які дозволяють порівнювати різні вироби однакового призначення з точки зору енергоспоживання. Особливо актуальною стає ця проблема з появою напівпровідникових світлодіодів, які відрізняються високою світловою віддачею, тривалістю служби та доступною ціною.

Аналіз наукових та нормативних джерел показує, що нинішні методи оцінки енергоефективності ДС базуються головним чином на двох параметрах – потужності та світлового потоку. Співвідношення світлової віддачі (відношення світлового потоку до потужності) або класи енергоефективності (A, B, C, D, E, F, G) визначаються за різними функціями.

Однак нинішня система критеріїв для порівняльного аналізу ефективності ДС ще не є універсальною. Більшість фахівців вважає, що світлова віддача (або клас енергоефективності) є визначальним параметром, хоча важливо враховувати інші аспекти, такі як тривалість служби, вартість утримання та чутливість до умов експлуатації.

З вищезазначеного випливає, що оцінка енергоефективності джерел світла не повинна обмежуватися одним лише параметром; решта (такі як тривалість служби, світловий потік, потужність, ціна) також мають бути враховані без додаткового дописування на етикетці.

Тому з появою світлодіодних джерел світла народжуються спроби оцінки енергоефективності за вартістю одиниці світлового потоку (грн/лм), вартістю та експлуатаційними витратами в розрахунку на добуток світлового потоку на тривалість служби (грн/(лм×год)), а також за питомою світловою енергією, розрахованою як відношення виробленої світлодіодами енергії до їхньої потужності (Млм×год/Вт). Крім того, спробують врахувати енергоефективність освітлювальних установок взагалі за параметром "світлозабезпеченості" – обсягом виробленої в країні світлової енергії на одну людину протягом року (Млм×год/(людина×рік)).

Проте ні один з авторів не довів системність запропонованого підходу до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їхнього вибору за загальнодоступними даними.

Таким чином, нашою основною метою стало розроблення системного підходу до оцінки енергоефективності на основі ранжування джерел світла за показниками класу енергоефективності, мінімальних та максимальних світлових віддач, вартості одиниць світлового потоку та одиниць світлової енергії.

4.2 Енергоефективність регулювання світловіддачі в лампах розжарювання та світлодіодних лампах

Аналіз останніх наукових досліджень і опублікованих матеріалів вказує на те, що підвищення енергоефективності освітлення передбачає не лише зниження загальної встановленої потужності освітлювальних систем за допомогою переходу до вискоелективних джерел світла, але й

скорочення загального споживання електроенергії. Це можна досягти лише за допомогою впровадження інтелектуальних систем управління освітленням. Освітлювальні установки або їхні компоненти повинні активуватися тільки тоді, коли це дійсно необхідно, забезпечуючи при цьому відповідний рівень освітленості (яскравості) з урахуванням впливу спектрального складу джерел світла на працездатність присмеркового та нічного зору людини (S/P-фактора).

На сьогодні утвердилася концепція, що регулювання (зменшення) світлового потоку від джерел світла автоматично вирішує проблему підвищення енергоефективності освітлювальних систем. З одного боку, це дійсно так, оскільки активна споживана потужність зменшується, хоча й нелінійно.

З іншого боку існує цілий ряд прихованих параметрів, які можуть ускладнити наші зусилля, якщо не визначити оптимальні межі регулювання світлового потоку.

В роботі досліджено ефективність управління (димерування) світлового потоку джерел світла на прикладі двох категорій: недорогих традиційних джерел світла, які є менш енергоефективними, але залишаються дуже популярними серед населення (ЛР), і дорогих перспективних світлодіодів, які є більш енергоефективними (СДЛ). Для досягнення цієї мети передували проведення досліджень електричних, світлотехнічних і експлуатаційних характеристик теплових та напівпровідникових джерел світла.

Внаслідок експериментальних даних отримано нормовані залежності, що аналогічні тим, представленим на рис. 3.4. Отримані залежності нормованих значень середньої тривалості світіння для теплових джерел світла (ЛР) та напівпровідникових (СДЛ) на основі аналізу експериментальних досліджень щодо впливу діючих значень напруги мережі на термін служби ЛР та температури р-п переходу, які виражені

через діючі значення струму за формулою:

$$t_H = 0,59 \cdot I_H + 0,42. \quad (4.1)$$

За експериментальними даними були графіки, представлені на рис. 4.1.

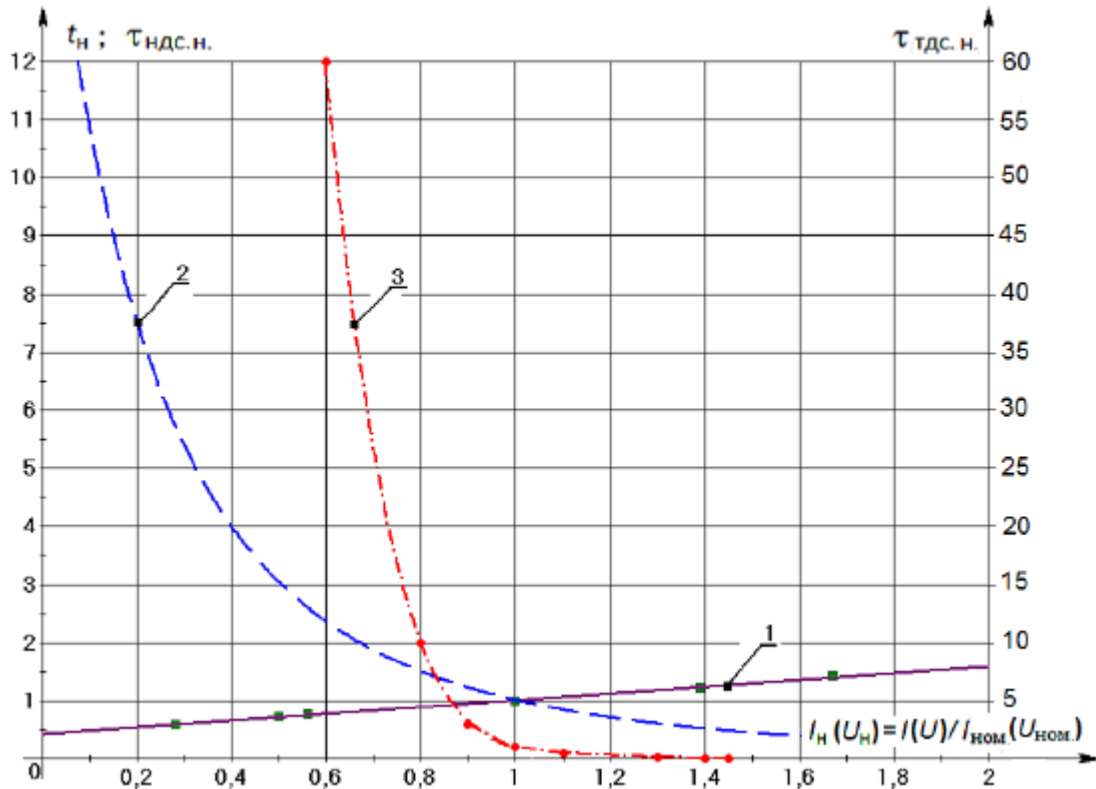


Рис. 4.1. Залежність терміну служби ЛР та температури діоду від струму і напруги:

1 – температури діоду СДЛ від струму I_H ; 2 – Терміну служби від струму I_H ; 3 – термін служби ЛР від значення напруги.

На базі кривих на рис. 4.1 отримані апроксимуючі математичні залежності терміну служби ЛР та СДЛ від робочих струмів та напруг:

Для ЛР:

$$\tau_{\text{тдс.н}} = -186,11 \cdot U_H^3 + 546,24 \cdot U_H^2 - 538,34 \cdot U_H + 178, \quad (4.2)$$

Для СДЛ:

$$\tau_{\text{здс.н}} = 0,998 \cdot (0,58 \cdot I_{\text{н}} + 0,418)^{-3,22}, \quad (4.3)$$

Проведений аналіз виявив, що скорочення світлового потоку ламп розжарювання завжди призводить до зменшення їхньої світлової віддачі. Це пояснюється тим, що інтенсивність спаду світлового потоку при зниженні напруги в мережі (крива 4 на рис. 3.4) завжди перевищує потужності ламп розжарювання (крива 3 на рис. 3.4). Якщо напруга в мережі перевищує номінальне значення (точка (1;1) на рис. 3.4), світловий потік (крива 4 на рис. 3.4) починає зростати швидше, ніж потужність (крива 3 на рис. 3.4), що призводить до збільшення світлової віддачі ламп розжарювання.

Регулювання світлового потоку світлодіодів (СДЛ) відбувається в зворотному напрямку. При зменшенні струму через СДЛ (рис. 3.4) світлова віддача зростає, а при збільшенні струму вона зменшується. Це свідчить про доцільність експлуатації світлодіодів при знижених, порівняно з номінальним значенням, значеннях струму.

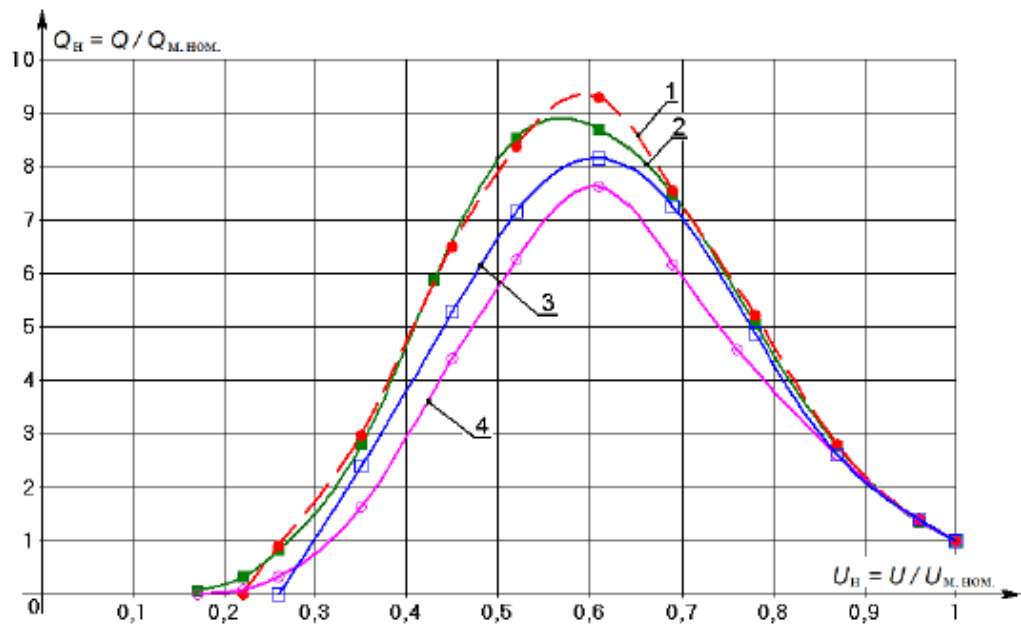
При збільшенні світлового потоку спостерігається зростання, а при зменшенні – зниження (криві 2 і 3 на рис. 4.1). Це визначається відповідними змінами у швидкості випаровування вольфраму у лампах розжарювання та температурі р-п переходу у світлодіодах.

Важливо відзначити, що швидкість змін нормованих значень світлового потоку, потужності і терміну служби в лампах розжарювання помітно перевищує швидкість відповідних змін у світлодіодах.

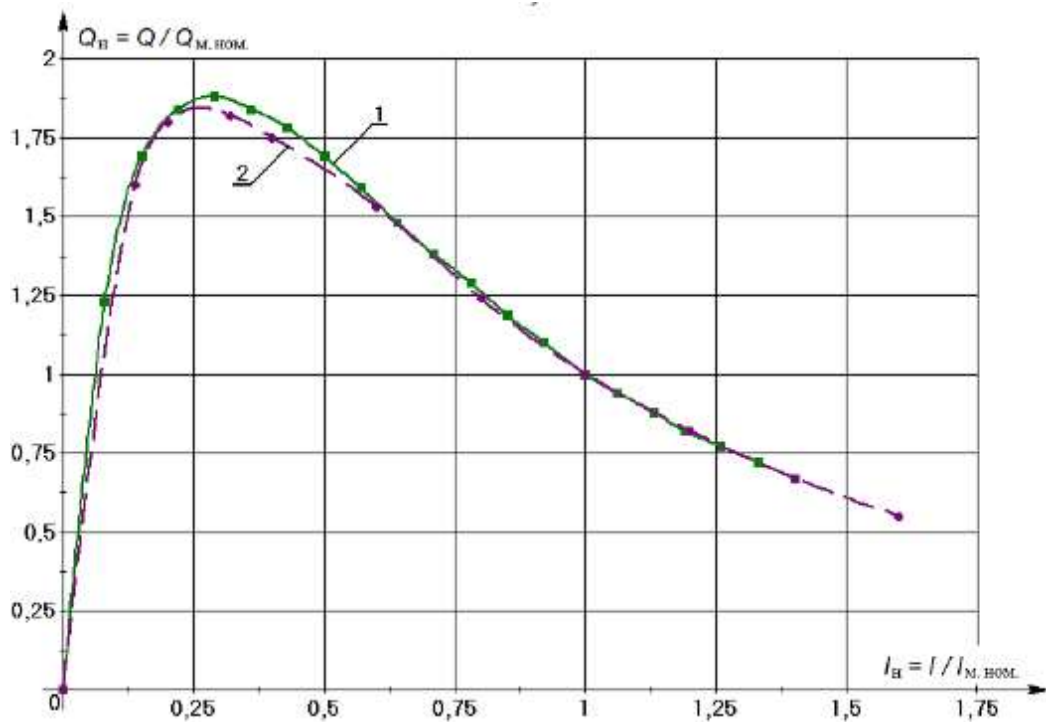
З використанням отриманих експериментальних даних, вирази (4.2), (4.3), були проведені розрахунки кількості виробленої нормованої світлової енергії $Q_{\text{н}}$ лампами розжарювання та світлодіодами (рис. 4.2) за термін служби за допомогою наступної формули:

$$Q_{\text{н}} = Q / Q_{\text{ном}} = F \cdot \tau / (F_{\text{ном}} \cdot \tau_{\text{ном}}). \quad (4.4)$$

Результати цих розрахунків наведені на рис. 4.2,а та 4.2,б відповідно.



а)



б)

Рис. 4.2. Залежність кількості світлової енергії від ЛР та СДЛ при зміні їх світлового потоку

а)1-4 -ЛР; б)1,2-СДЛ

Аналіз рис. 4.2 показав, що обсяг виробленої світлової енергії в процесі зменшення напруги на ЛР та струму через СДЛ спочатку поступово збільшується, а потім зменшується, досягаючи максимального значення при певних значеннях напруги мережі для ЛР і конкретних значеннях струму через СДЛ.

Отримані відомості дозволяють визначити діапазон значень аргументів, при яких обсяг виробленої світлової енергії лампи досягне свого максимуму. Це, безумовно, важливо, але не вистачає для повноцінного визначення енергоефективності лампи на етапах їх вибору та експлуатації, незалежно від того, чи це відбувається в стаціонарному чи динамічному режимі світіння.

Такий підхід базується на визначенні вартості одиниці світлової енергії, виробленої ДС з урахуванням середньої тривалості роботи як на етапі вибору, так і під час експлуатації.

Враховуючи вартість лампи, тариф на електроенергію, спад світлового потоку в процесі експлуатації та вартість необхідної для нормальної роботи лампи пускорегулювальної апаратури (драйвера), розрахунки енергоефективності лампи рекомендується здійснювати за допомогою наступних формул.

Вартість питомої світловіддачі без врахування втрат в ПРА лампи:

$$C_{qP} = (C_{дс} + C_{ПРА}) \cdot P_{дс} / (F_{ном} \cdot \tau_{дс}), \quad (4.5)$$

Вартість питомої світловіддачі з врахуванням втрат в ПРА лампи:

$$C_{qP.е.} = [(C_{дс} + C_{ПРА}) + (P_{дс.} + \Delta P_{ПРА.}) \cdot \tau_{дс.} \cdot q] \times \\ \times (P_{дс.} + \Delta P_{ПРА.}) / (\tau_{дс.} \cdot \int_0^{\tau} F(t) dt), \quad (4.6)$$

На основі розрахунків за формулами (4.5 і 4.6) були складені відповідні графіки, які представлені на рис. 4.3 та 4.4. Проведений аналіз цих графічних залежностей вказує на те, що оцінка енергоефективності регулювання світлового потоку лампи, з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої за термін служби, визначається конкретним типом лампи.

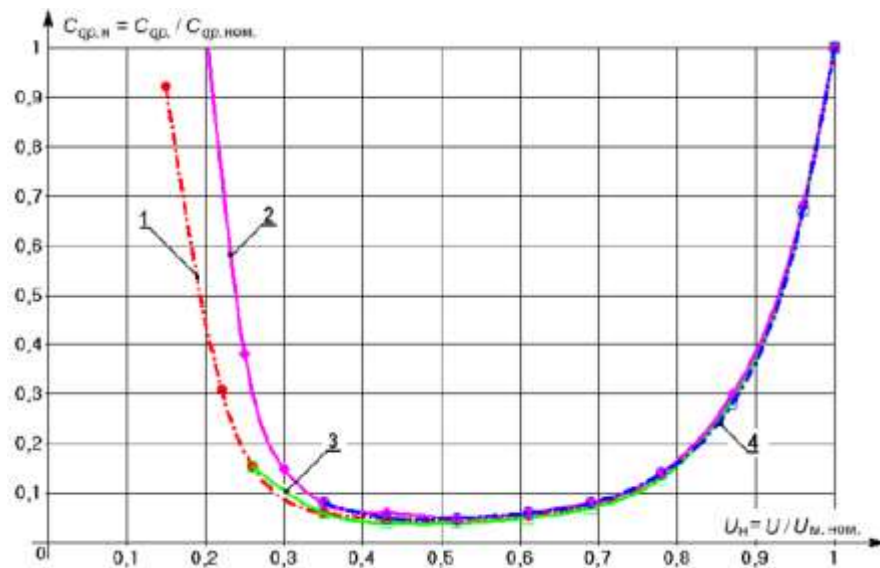


Рис. 4.3. Залежність енергоефективності керування світловим потоком ЛР від питомої вартості одиниці світлової енергії

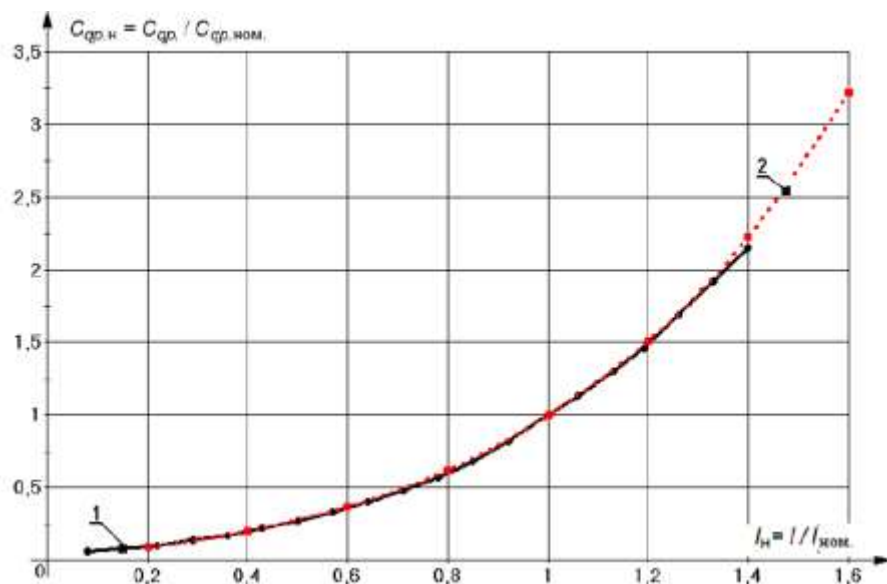


Рис. 4.4. Залежність енергоефективності керування світловим потоком ЛР від питомої вартості одиниці світлової енергії

Отже, якщо врахувати, що залежність енергоефективності регулювання світлового потоку з погляду нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої ДС під час димерування, представлена на рис. 4.3 і рис. 4.4 як постійно спадаюча, можна зазначити, що такі ДС не є оптимальним варіантом для димерування.

Найкращим рішенням для них буде експлуатація в режимі ввімкнено-вимкнено, заснованому на використанні датчиків присутності. Застосування димерування світлового потоку в системах зовнішнього освітлення дозволяє зекономити до 25%, при цьому оптимальною є реалізація глибини регулювання на рівні 50% протягом половини періоду функціонування освітлювальних установок в нічний час (або повного їх вимкнення на 3 години), коли інтенсивність дорожнього руху мінімальна.

Висновки з розділу

1. Доведено, що застосування системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок, який враховує максимальну кількість параметрів, дозволяє отримати реалістичні дані про їхню енергоефективність. Використання результатів розрахунків за системним підходом призводить до економічного виграшу в розмірі 10-25%, завдяки впровадженню освітлювальних установок з найменшою питомою вартістю одиниці світлової енергії.

2. Виявлено, що для кожного типу джерел світла, залежно від фізичних принципів їхньої, характерні власні діапазони значень аргументів, де регулювання світлового потоку є економічно доцільним. У випадку напівпровідникових джерел світла такі обмеження відсутні.

3. Доведено, що оптимальним для енергоефективного регулювання світлового потоку ДС є те значення аргументу, в околі якого спостерігається не тільки мінімальна нормована питома вартість одиниці світлової енергії, але й максимальна виробництво цієї енергії.

4. Розроблено аналітичну залежність для визначення втрат потужності в електромагнітних баластних дроселях для розрядних ламп низького та високого тиску. Це дозволило оцінити їх вплив на енергоефективність ОУ як в стаціонарному режимі експлуатації, так і при димеруванні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Зазначено, що основою ефективної енергетичної стратегії нашого часу повинні бути: енергобезпека, енергоефективність, енергозбереження та екологія.

2. Радикальне підвищення ефективності використання енергії в освітленні можливе за допомогою переходу на вискоефективні ДС та впровадження інтелектуальних систем управління освітленням, що призведе до зниження загального споживання енергії.

3. Існуючі методи диммерування світлового потоку ДС не враховують вплив динаміки важливих параметрів, таких як електромагнітна сумісність, коефіцієнт потужності та пульсація світлового потоку, що іноді може призводити до сумнівів у їхній ефективності.

4. З появою напівпровідникових джерел світла, що відрізняються не лише високою світловою віддачею і тривалістю служби, але й великою вартістю, виникла необхідність у системному підході до оцінки енергоефективності освітлювальних систем, побудованих на їхній основі.

5. Отримано аналітичні вирази для функціональних залежностей між номінальною світловою віддачею і номінальною потужністю для всіх існуючих джерел світла.

6. Запропоновано методику для конкретизації можливих змін номінальних світлової віддачі при зростанні номінальної потужності джерела світла.

7. Доведено, що світлова віддача для джерел світла не білого кольору зростає. Реальні значення світлової віддачі для джерел білого світла з високим індексом кольоропередачі ($R_a \geq 93$) ростуть до 131 лм/Вт.

8. Отримано аналітичні вирази для визначення світлової віддачі джерел білого світла у вибраному діапазоні електромагнітного випромінювання у видимій області спектру для денного і нічного зору, що

дозволяє визначати візуальну ефективність джерела світла.

9. Встановлено функціональні залежності динаміки світлового потоку від джерел світла під час експлуатації, що дає змогу визначати обсяг світлової енергії, створеної за будь-який наперед визначений проміжок часу.

10. Доведено, що зниження світлового потоку під час перехідного процесу від моменту включення до переходу в усталений режим в межах до 10% свідчить про те, що при такому тепловому режимі світлотехнічного виробу середній термін служби світлодіодів буде приблизно рівним заявленому в нормативно-технічній документації номінальному значенню. Вище 10% зменшення світлового потоку свідчить про надмірний перегрів р-п переходу світлодіодів, що веде до зниження світлової віддачі та середнього терміну служби нижче визначених виробником значень.

11. Доведено, що застосування системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок, який враховує максимальну кількість параметрів, дозволяє отримати реалістичні дані про їхню енергоефективність.

12. Виявлено, що для кожного типу джерел світла, залежно від фізичних принципів їхньої, характерні власні діапазони значень аргументів, де регулювання світлового потоку є економічно доцільним. У випадку напівпровідникових джерел світла такі обмеження відсутні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іншеков Є.М. Екологічний аспект національної енергетичної стратегії в контексті сталого розвитку держави. // Є.М. Іншеков, О.М. Козуб, О.С. Дробаха // Енергетика: економіка, технології, екологія. -2010. - С. 98–103.
2. Кожушко Г. М. Енергозбереження в світлотехніці. / Г. М. Кожушко // Світлолюкс. - 2008. - № 8. - С. 13-16
3. Кожушко Г.М. Екологічні проблеми утилізації та використання відходів розрядних ламп. / Г.М. Кожушко // Світлолюкс. -2007. -№ 6. - С. 50-52.
4. Кожушко Г.М. Енергоекономічні джерела світла ХХІ століття. / Г.М. Кожушко // Світлолюкс. - 2005. - № 6. - С. 2-4.
5. Мордюк В.С. Материаловедение и прогресс в светотехнической науке и технике. / В.С. Мордюк // Светотехника. - 2006. - № 6. - С. 2-4.
6. Варрен Джулиан. В Австралии лампы накаливания будут вне закона. / Джулиан Варрен // Светотехника. - 2007. - № 3. - С. 72.
7. Подопрігора В.М. Свет в интерьере - технические аспекты. / В.М. Подопрігора // Світлолюкс. - 2008. - № 3 - С. 28-31.
8. Медведев М.Г. Некоторые соображения о замене ламп накаливания на компактные люминесцентные лампы. / М.Г. Медведев // Светотехника.-2010. - № 2. - С. 72.
9. Бодрат М. Характеристики компактных люминесцентных ламп со встроенными пускорегулирующими аппаратами и их сравнение с лампами накаливания. / М. Бодрат, А. Денейер, Б. Ройзин // Светотехника. 2010. - № 2. - С. 13-20. 21. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 1. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. - 2005. - № 9. - С. 140-146.
10. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов.

Часть 1 / С. Никифоров // Компоненты и технологии. - 2005. - № 8. - С. 18-23.

11. Cree announces a new laboratory LED efficacy milestone at SIL. URL: <http://ledsmagazine.com/news/10/2/16?Cmpid=EnlLEDsFebruar202013>.

12. Бегманн Т. Светоизлучающие диоды -тенденции развития и влияние на освещение. / Т. Бегманн // Светотехника. - 2001. - № 5. - С. 10-14.

13. Сабинин В.Е. Светоизлучающие диоды в глобальной экономике. / В.Е. Сабинин // Светотехника. - 2002. - № 3. - С. 9-10.

14. Коган Л.М. Светодиодные осветительные приборы. / Л.М. Коган // Светотехника. - 2002. - № 6. - С. 16-20.

15. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения в будущем. / А.Э. Юнович // Светотехника. - 2003. - № 3. - С. 11-15.

16. Раттунде Р. Спектр распределения потока излучения сигнальных светодиодных ламп. / Р. Раттунде // Светотехника. - 2005. - № 2. - С. 16-20.

17. Поляковский В. Светодиоды для освещения. / В. Поляковский // Сви- тлолюкс. - 2005. - № 5. - С. 44-46.

18. Гальчина Н.А. Мощные белые светодиоды и модули на их основе для целей освещения. / Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин // Светотехника. - 2007. - № 2. - С. 26-28.

19. Гольдер С. Светильники с белыми светодиодами и высокоэффективным преобразователем постоянного тока. / С. Гольдер., С. Мазмудар, К. Рей // Светотехника. - 2007. - № 2. - С. 38-41.

20. Заремба К. Светильники с высокомоощными светодиодами для общего освещения. / К. Заремба, А. Павлак // Светотехника. -2008. - № 2. - С. 60-63.

21. Лашик С.И. Проблемы применения светодиодов в осветительных и светосигнальных устройствах и пути их решения. / С.И.

Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. -2008. -№ 4. -С. 22–

22. Лашик С.И. Конструктивно-технологические решения светодиодных ламп прямой замены. / С.И. Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. - 2010. - № 2. - С. 7-12.

23. Сорокин В.М. Светодиодное освещение расширяет границы. / В.М. Сорокин // Світлолюкс. - 2009. - № 2 - С. 37-41.

24. Тараненко Е. Энергоэффективные осветительные приборы на светодиодных источниках света - необходимость и реальность сегодняшнего дня. / Е. Тараненко, В. Трофимец // Світлолюкс. - 2009. - № 2. - С. 48-45.

25. Лашик С.И. О светодиодных лампах прямой замены. / С.И. Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. -2010. -№ 1. -С. 48–54.

26. Подопригора В.М. Эти странные LED лампы (заметки практика)/ В.М. Подопригора // Світлолюкс. - 2013. - № 3. - С. 29-31.

27. Козлов А. Способы обеспечения питания светодиодов. / А. Козлов // СНІР News Украина. - 2008. - № 3 (73). - С. 4-6.

28. Арексис Л. О пульсациях выпускаемых ламп. / Л. Арексис, С. Китси-нелис, Ж. Циссис // Светотехника.- 2012. - №3. - С. 58-63.

29. Липовецький В. Вплив напруги живлення на параметри розрядних ламп високого тиску. / В. Липовецький, М. Липовецький, Р. Пилипчук // Світлолюкс - 2009. - № 5. - С. 63-67.

30. Wilkins A.J. Modulation from fluorescent lamps / A.J. Wilkins, C. Clark // Lighting Research and Technology. - 1990 - Vol. 22 , No. 2.- P. 103-109.

31. Wilkins A.J. A tint to reduce eye-strain from fluorescent lighting, Preliminary observations. / A.J. Wilkins, P Wilkinson // Ophthalmic and Physiological Optics. - 1991 - No. 11. - P. 172-175. 53. <http://ekosf.ru/poleznoe->

alias/articles/525-pulsacii.

32. Ильянок В. А. Влияние пульсирующих источников света на электрическую активность мозга человека. / В. А. Ильянок, В.Г. Самсонова // Светотехника. - 1963. - № 5. - С. 16-20.

33. Масекане К.С. Зрительная работоспособность при питании ламп током повышенной частоты. / К.С. Масекане // Светотехника. - 1967. - № 10. - С. 8-12.

34. Масекане К.С. Исследование работоспособности в условиях промышленной осветительной установки на повышенной частоте К.С. Масекане // Светотехника. - 1968. - №8. - С. 9-11.

35. Державні будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. ДБН В.2.5-28-2006. Київ. -2006. -Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. - 75 с.

36. Тарасенко М.Г. Дослідження характеристик люмінесцентних ламп у схемах з електронними пускорегулювальними апаратами з ініціювальним генератором. / М.Г. Тарасенко // Електроінформ. - 2009. - № 3. - С. 15-18. Тарасенко Н.Г. Расчет двухчастотных схем включения газоразрядных ламп. / Н.Г. Тарасенко, Р.У. Резаков // Электротехническая промышленность. Сер. Светотехнические изделия. - 1982. - вып. 2 [74]. - С. 3-6.

37. Бармин В.В. Некоторые острые вопросы светотехники, требующие решения. / В.В. Бармин // Светотехника. - 2005. - № 4. С. 65-70.

38. Гусева Л.С. Пульсация освещенности в установках с лампами типов ДРИ и ДНаТ. / Л.С. Гусева, Г.К. Смирнов, М.А. Фаермарк // Светотехника. - 1984. - №.10. - С. 1-3.

39. Уткин В.Н. К расчету коэффициента пульсации освещенности. / В.Н. Уткин. // Светотехника. - 1987. - №.7. - С. 11-14.

40. Кузьмин В. Приборы для измерения оптических параметров и

характеристик светодиодов. / В. Кузьмин, В. Антонов, О. Круглов // Полупроводниковая светотехника. - 2010. - № 3. - С. 26-31.

41. Миронов С. Правильное питание светодиодов -залог их здоровой и долгой жизни. Обзор источников питания для различных применений. / С. Миронов // CHIP NEWS Украина. - 2013. -№ 4 (124). -С. 12-16.

42. Ошурков И. Обоснованный подход к нормативам пульсаций светодиодного освещения. / И. Ошурков // CHIP NEWS Украина -2013. - № 6 - С. 38-41.

ДОДАТКИ

Додаток А**А.1 Охорона праці та техніка безпеки**

Освітлення території підприємств, допоміжних приміщень і окремих робочих місць повинно відповідати вимогам ДБН В. 2.5-28:2008.

Робоче освітлення повинно забезпечувати освітленість на робочих поверхнях не нижче нормативної.

Аварійне освітлення повинно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість не менше ніж 5 % від нормативної. За системи загального освітлення рівень аварійного освітлення повинен бути не менше ніж 2 лк всередині приміщень.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати освітленість на підлозі основних проходів, на землі та на східцях сходів не менше ніж 0,5 лк.

Кріплення світильників робочого та аварійного освітлення повинно бути надійним, а розташовані вони повинні бути так, щоб забезпечити безпеку та зручність їх обслуговування. Обслуговування світильників з переносних драбин, з вантажопідіймальних кранів, зі спеціальних пересувних вишок повинно бути безпечним.

Обслуговування світильників освітлення будівель з вантажопідіймальних кранів необхідно здійснювати не менше ніж двома працівниками за нарядом- допуском з дотриманням вимог техніки безпеки.

Проектною документацією та інструкціями, що затверджені роботодавцем, повинні бути передбачені заходи з обслуговування світильників для постійного забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Під час зміни технологічного процесу, заміни або перестановки устаткування на окремій ділянці цеху освітленість цієї ділянки необхідно привести у відповідність з чинними нормативно-правовими актами.

У процесі експлуатації освітлювальних установок необхідно періодично проводити такі види обслуговування:

не менше ніж один раз на рік перевіряти рівень освітленості в контрольних точках і рівень загальної освітленості приміщень;

- перевіряти наявність у світильниках скла, ґрат, сіток, справність світильників спеціального виконання тощо в строки, визначені особою, відповідальною за електрогосподарство;
- виконувати очищування ламп і освітлювальної арматури для приміщень з інтенсивним пиловиділенням - 4 рази на місяць, для приміщень з незначним виділенням пилу, кіптяви - 2 рази на місяць;
- не менше ніж один раз у квартал перевіряти справність аварійного та евакуаційного освітлення.

Під час засклення ліхтарів будівель віконним склом необхідно під засклення встановлювати горизонтальні металеві сітки шириною не менше ніж 0,7 м при вертикальному склінні, а при нахиленому та горизонтальному ширина сіток повинна визначатися розрахунком з величини горизонтальної проекції засклених рам.

Світильники, що розташовані на висоті не більше ніж 4,5 м над рівнем підлоги, обслуговують з переносних драбин. Не дозволяється розташовувати світильники над устаткуванням і стрічками конвеєрів. У випадку, коли обслуговування світильників з драбин ускладнено, необхідно облаштовувати спеціальні майданчики. Для обслуговування світильників, розташованих над кранами або кран-балками, на підприємствах, що будуються та реконструюються, необхідно передбачати спеціальні майданчики, що не повинні перешкоджати обслуговуванню та ремонту кранів.

Для запобігання затіненню робочих місць кранами повинно бути передбачено додаткове підкранове освітлення світильниками, що підвішені до нижніх частин ферм кранів.

На висоті монтажу світильників більше 5 м їх обслуговування необхідно проводити з пересувних вишок, кошиків та інших пристосувань.

Пересувні вишки повинні бути обладнані майданчиками з перилами, виконаними відповідно до вимог пункту 9.2 розділу VII цих Правил. Для доступу на майданчики повинні бути передбачені сходи (скоби).

Вмикання та вимикання рубильників загального освітлення в будівлях цехів, зміна та очищення світильників, арматури та ламп, зміна штепсельних розеток і запобіжників, монтаж проводів може проводити тільки електротехнічний персонал.

Для переносного електричного освітлення необхідно застосовувати світильники напругою не вище ніж 42 В. Під час роботи всередині металевих ємностей, печей, котлів, колодязів, млинів напруга в освітлювальній мережі повинна бути не вище ніж 12 В. У місцях, де в повітрі є або можуть бути вибухонебезпечні гази, пари та пил, для переносного освітлення необхідно застосовувати світильники у вибухозахищеному виконанні напругою не вище ніж 12 В.

Захаращувати світлові прорізи приміщень матеріалами, виробами, інструментом та іншими предметами не дозволяється.

На підприємствах повинні бути розроблені та затверджені роботодавцем інструкції з охорони праці щодо розміщення світильників для забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Основні причини нещасних випадків від дії електричного струму:

- випадковий дотик, наближення на небезпечну відстань до струмопровідних частин, що перебувають під напругою;
- поява напруги дотику на металевих конструктивних частинах електроустаткування (корпусах, кожухах тощо) у результаті пошкодження ізоляції або з інших причин;
- поява напруги на відключених струмопровідних частинах, на яких працюють люди, унаслідок помилкового включення установки;

- виникнення напруги кроку на поверхні землі через замикання проводу на землю.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин, що перебувають під напругою, для випадкового дотику;

- електричний поділ мережі;

- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням; - застосування малих напруг;

- захист від випадкового дотику до струмопровідних частин застосуванням кожухів, огорож, подвійної ізоляції;

- захист від небезпеки при переході з вищої на нижчу напругу;

- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;

- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;

- застосування спеціальних електрозахисних засобів - переносних приладів і запобіжних пристроїв;

- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по іншим причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т. п.). Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучих металічних частин, що опинилися під напругою в наслідок замкнення на корпус та по іншим причинам. Захисне заземлення потрібно відрізняти від робочого заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Заземлення блискавкозахисту – навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підйом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого обладнання).

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час дуже ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах. Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати, працюють люди”, “Не відкривати, працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.
5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Керівник підприємства зобов'язаний забезпечити утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для цього він повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку;
- забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників;
- затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці;
- встановити такий порядок, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування електроустановок, вели ретельні спостереження за дорученим їм обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням;
- забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки згідно з вимогами ПТЕЕС;
- забезпечити проведення проти аварійних, приймально-здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок згідно з правилами і нормами (ПТЕЕС);
- забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці зобов'язані контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки. Забороняється покладати на енергослужбу обов'язки, що не входять до її професійної компетенції. Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку ПТБ та ПТЕ.[25]

А.2. Розрахунок блискавкозахисту

Розрахунок блискавозахисту – це значить визначити тип захисту[26]. По типу блискавозахисту може бути наступною:

- однострижневий;
- двухстрижневий однаків або різною висотою;
- багатократний стержневий;
- багатократно тросовий.

Для розрахунку данного об'єкта перерахуємо вихідні данні:

$h = 25$ м, $h_x = 6$ м, $B = 100$ м, $n = 2$, тип блискавкозахист – однострижнева.

где h – повна висота стержневого блискавкозахисту, м;

h_x – висота споруди яку захищаємо, м;

B – ширина об'єкта ;

n – середньорічне число ударів блискавки в 1 км² земної поверхні в місці знаходження будівлі або споруди (тобто питома щільність ударів блискавки в землю), 1 / (км/год).

Визначаємо параметри блискавкозахисту:

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ м} \quad (\text{A.1})$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot h = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot 25 = 26,25 \text{ м} \quad (\text{A.2})$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h)(h - 1,2 \cdot h_x) = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot (25 - 1,2 \cdot 6) = \quad (\text{A.3})$$

$$18,7\text{м}$$

$$h_m = h - h_0 = 25 - 21,25 = 3,75 \text{ м} \quad (\text{A.4})$$

$$h_a = h - h_x = 25 - 6 = 19\text{м} \quad (\text{A.5})$$

$$\alpha = \arctg \frac{r_0}{h_0} = \arctg \frac{26,25}{21,25} = 51^\circ \quad (\text{A.6})$$

Визначаємо габаритні розміри об'єкта який ми захищаємо блискавкозахистом

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{2r_x} = \arcsin \frac{100}{2 \cdot 18,7} = 69^\circ, \cos \varphi = \cos(69^\circ) = 0.35 \quad (\text{A.7})$$

$$A = 2r_x \cos \varphi = 2 \cdot 18,7 \cdot 0,35 = 13,09 \text{ м} \quad (\text{A.8})$$

$$A \times B \times H = 13,09 \times 100 \times 6$$

Визначаємо можливу вражуваність захищається в зонах при відсутності блискавкозахисту:

$$N = \left[(B + 6h_x)(A + 6h) - 7,7h_x^2 \right] n \cdot 10^{-6} = \\ = \left[(100 + 6 \cdot 6)(13,9 + 6 \cdot 6) - 7,7 \cdot 6^2 \right] \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 3,81 \cdot 10^{-3}, \text{ вражувань} \quad (\text{A.9})$$

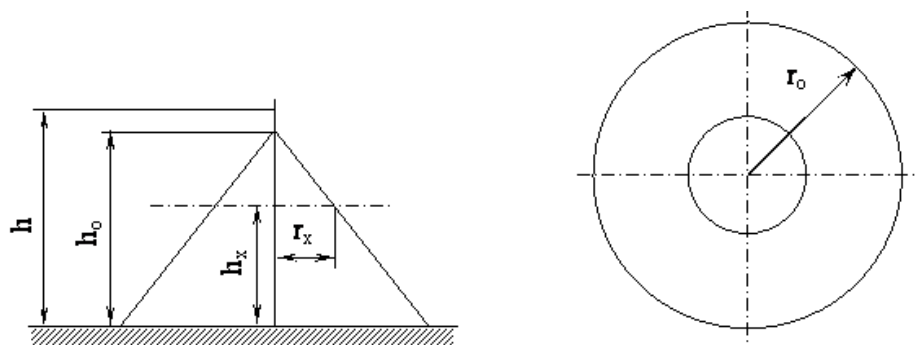


Рис. А.1 Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

А.3. Розрахунок захисного заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені.

Грунт – супісь, другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

Визначається норма на опір заземлення R_z^H .

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_z \leq \frac{125}{I_z} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом} \quad (\text{A.7})$$

Згідно ПУЕ, так як сумарна потужність струмоприймачів більш 100 кВА то R_z повин бути не більше 4 Ом. Приймається $R_z = 4 \text{ Ом}$.

Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (\text{A.8})$$

де $\rho_{\text{табл}}$ - табличне значення, для супіску $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

ψ - підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів $\psi = 1,4$.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{350}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 20,361 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

де l – довжина заземлювача, приймається 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаються стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м}, \quad (\text{A.10})$$

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаються електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану та визначається орієнтовна кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3 \cdot \eta_t} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт} \quad (\text{A.11})$$

де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l=4/5=0.8$, $\eta_o=0,59$ за рис. 7.5 [12].

де $a = 4$ м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м}. \quad (\text{A.12})$$

Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом}, \quad (\text{A.13})$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм.

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n + R_3^H} = \frac{24 \cdot 4}{24 + 4} = 4,8 \text{ Ом.} \quad (\text{A.14})$$

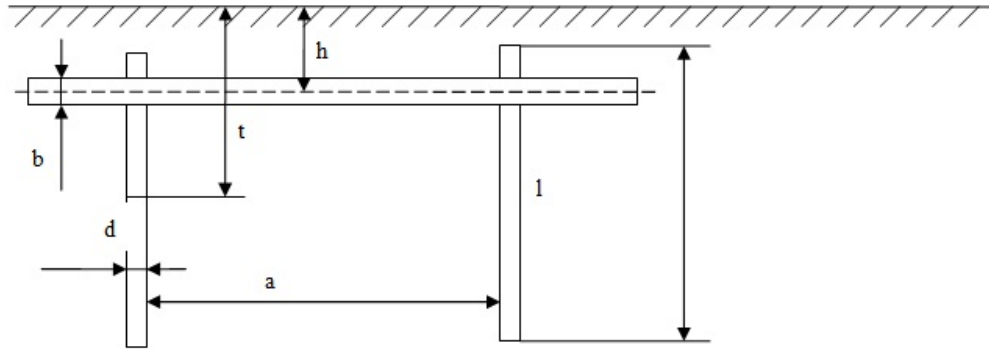


Рисунок А.2. Схема прокладки
заземлення Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{20,361}{4,8 \cdot 0,59} = 7,49 \approx 8 \text{ шт.} \quad (\text{A.15})$$

Проводиться перевірка опору заземлювача і порівнюється отримане значення з нормуємим:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.} \quad (\text{A.16})$$

Дійсний опір заземлюючого пристрою з 8-ма заземлювачами не перевищує нормуючого значення, 4 Ом.