



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 «Електроніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ І.М. Бондаренко

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Корнієнко Тетяні Василівні \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та оптимізація спектральної характеристики напівпровідникового випромінювача

затверджена наказом університету від 15.10. 2019 року № 203 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09.12. 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_

3.1. Випромінювачі для порівняльного дослідження: газорозрядні ДРЛ, ДНаТ, металогалогенні, світлодіодні, їх електричні та оптичні характеристики

3.2. Спектри фотосинтезу рослин, спектри джерел та необхідні рівні освітленості

3.3. Врахування екологічних, ергономічних та енергозберігаючих аспектів

3.4. Розрахувати параметри освітлювача для використання у побутовому варіанті підсвітлення кімнатних рослин

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1. Огляд типів, конструкцій, складу та характеристик випромінювачів;

4.2. Порівняльний аналіз структур фітоосвітлювачів та вимог до них;

4.3. Вибір метода вимірювання спектральної характеристики;

4.4. Розробка складу та конструкції освітлювача з необхідним спектром випромінювання для побутового парнику площею 0,75 м<sup>2</sup>, освітленістю 15000 лк, висотою 0,5 м.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) презентація.

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз завдання на атестаційну роботу	18.10.19	
2.	Аналітичний огляд методів та конструкцій	28.10.19	
3.	Порівняння та вибір методів вимірювання спектру	11.11.19	
4.	Вибір типу, конструкції, компоновки, освітлювача	18.11.19	
5.	Розрахунки характеристик пристрою	25.11.19	
6.	Оформлення пояснювальної записки	30.11.19	
7.	Підготовка презентації	05.12.19	
8.	Подання роботи до захисту	09.12.19	

Дата видачі завдання

14 жовтня 2019 року

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доцент Галат О.Б.  
( підпис ) ( посада, прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 71 с., 30 рис., 2 табл., 13 джерел.

ОСВІТЛЮВАЧ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, НАПІВПРОВІДНИК, СВІТЛОДІОД,  
ВИПРОМІНЮВАННЯ, СПЕКТР, ЛЮМІНЕСЦЕНТНА ЛАМПА,  
ХАРАКТЕРИСТИКА.

Об'єкт дослідження – спектр джерела випромінювання освітлювача для рослин.

Мета роботи – оптимізація складу та конструкції освітлювача для тепличних та кімнатних рослин виходячи з найбільш ефективної спектральної характеристики.

Метод дослідження – аналітичний метод порівняння спектральних характеристик різних випромінювачів, вибір випромінювачів за основними характеристиками: ефективність, термін експлуатації, екологічність освітлювачів.

Розглянуто декілька типів випромінювачів, у результаті всебічного аналізу у якості елемента освітлювача був обраний світлодіод, оскільки він має ряд переваг перед іншими випромінювачами.

Результати роботи можуть використовуватися для проектування освітлення в теплицях, де вирощують овочі, фрукти, квіти тощо, а також для квартир, будинків з домашніми рослинами.

## ABSTRACT

Explanatory note consists of: 71 p., 30 Fig., 2 table, 13 sources.

ILLUMINATOR, EFFICIENCY, SEMICONDUCTOR, LED, RADIATION, SPECTRUM, FLUORESCENT LAMP, CHARACTERISTIC.

The object of study is the spectrum of the radiation source of the illuminator for plants.

The work purpose is optimization of the design of the illuminator for greenhouse and indoor plants on the basis of the most efficient spectral characteristics.

Research method – analytical method of comparing the spectral characteristics of various transducers, selection of transducers with the basic characteristics: efficiency, lifetime, environmental friendliness of illuminators.

Describes several types of emitters, as a result of comprehensive analysis as part of the illuminator was chosen as the led, because it has several advantages over other emitters.

The results can be used to design lighting in greenhouses, where they grow vegetables, fruits, flowers, etc., and also for apartments, houses with house plants.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОСВІТЛЮВАЧІВ	10
1.1 Компоненти для джерел випромінювання	10
1.2 Напівпровідникові джерела випромінювання	21
2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	27
2.1 Імітатор спектральних приладів	27
2.2 Методи спектрометрії	29
2.3 Одноканальні спектральні прилади	31
2.4 Багатоканальні спектральні прилади	35
3 СВІТЛОДІОДНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ	36
3.1 Конструкції та основні параметри світлодіодів	36
3.2 Колориметричні характеристики світлодіодів	38
3.3 Ультрафіолетові та сині світлодіоди	47
3.4 RGB системи	48
3.5 Органічні світло випромінюючі світлодіоди (OLED)	49
3.6 Мініатюрні СВД	50
3.7 СВД середньої та великої потужності	51
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ РОСЛИННИХ КУЛЬТУР	53
4.1 Необхідність систем освітлення в залежності від видів рослин	53
4.2 Критерії вибору джерел випромінювання для освітлення рослин	54
4.3 Конструкції та варіанти розміщення ламп штучного освітлення	55
4.4 Порівняльні характеристики сучасних освітлювачів для рослин	60
4.5 Методика розрахунку відносної ефективності випромінювачів та результати оцінки ефективності та ККД	62
4.6 Розрахунок складу, компоновки та параметрів світлодіодного освітлювача	68

4.7 Вибір блоку живлення для світлодіодного освітлювача	69
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	72
ДОДАТОК А Відомість атестаційної роботи магістра	74
ДОДАТОК Б Презентація	75

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- CIE – міжнародна комісія з освітлення;
- LCD – рідкокристаличний дисплей;
- OLED – органічний світловипромінюючий діод;
- АФ – апаратна функція;
- ДНаТ – дугова натрієва трубчаста газорозрядна лампа;
- ИЧ – інфрачервоний;
- К – константа;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- ЛР – лампа розжарювання;
- МГЛ – металогалогенна лампа;
- НПІ – напівпровідниковий індикатор;
- НВЧ – надвисока частота;
- О – об'єктив;
- СВД – світловипромінюючий діод;
- Т – температура;
- УФ – ультрафіолет;

## ВСТУП

Електроніка являє собою галузь науки і техніки, що стрімко розвивається. За останні роки вона зазнала значних перетворень. Здебільшого це пов'язано зі стрімким розвитком мікроелектроніки. Поява нових схемних рішень як окремих підсилювачів, так і мікропроцесорних комплектів тощо, призвело до оновлення елементної бази.

Особливо перспективною в останні роки стала напівпровідникова електроніка, що займається дослідженням електронних процесів в напівпровідниках і їх використанням - головним чином з метою перетворення і передачі інформації. Важливим напрямком є вивчення систем відображення інформації або індикаторів, а також пристроїв освітлення для житлових приміщень, вулиць, підсвічування рослин в теплицях.

Якщо для освітлення житла основними вимогами є рівень і комфортність освітлювальних приладів для людини, то для вирощування рослин потрібні зовсім інші критерії: ефективність перетворення світла в корисний приріст, стійкість до впливу вологи і перепадів температур, зручність в експлуатації. Важливу роль у забезпеченні зазначених вимог грає спектр випромінювання освітлювача. І якщо в першому випадку спектр повинен бути максимально наближений до сонячного (для адекватної передачі кольорів), то в другому потрібно дослідження ефективності поглинання різних довжин хвиль випромінювання конкретними рослинами, вплив кольору випромінювання на швидкість фотосинтезу, і, в кінцевому підсумку, швидкість росту рослин, відсутність специфічних захворювань, споживчі властивості продукції.

Якість світла випромінювача залежить від точності передачі кольорів елементами освітлювача. Електроспоживання пов'язано з ефективністю випромінювачів, конструкцією оптичної системи, розміщенням освітлювачів. Для освітлення застосовують різні типи приладів: лампи розжарювання,

газорозрядні лампи, натрієві та ртутні лампи високого тиску, світлодіодні лампи та інші.

Мета атестаційної роботи – оптимізація складу та конструкції освітлювача для тепличних рослин виходячи з найбільш ефективної спектральної характеристики.

# 1 СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОСВІТЛЮВАЧІВ

## 1.1 Компоненти для джерел випромінювання

1.1.1 Ньютон у своїх дослідах отримав інформацію, що склад сонячного світла досить широкий. Керуючись експериментальними даними, наприклад, аналізуючи склад світла приладом на основі призми, можна встановити, що світло широкого кола інших джерел (лампа розжарювання, електрична дуга, світлодіодні джерела, газорозрядні освітлювачі.) також можна розглядати, як таке, що має складний характер. Якщо порівняти спектри тіл, що світяться, отримаємо, що відповідні ділянки спектра мають яскравість, що відрізняється. В різних ділянках спектра енергія розподілена по-різному. Більш надійніше переконатися в цьому можна, за умови досліджування спектрів за допомоги спектрального приладу на основі термоелемента або піроелектричного приймача.

Звичайні джерела мають ці відмінності в спектрі не вельми значні, але їх можна досить легко виявити. Людське око навіть без допомоги спектрального апарату бачить відмінності в розподілу кольору білого світла, що дається вказаними джерелами. Таким чином, світло свічки комусь здається жовтим або навіть помаранчевим в порівнянні з лампою розжарювання, тоді як остання ближче до жовтого, ніж сонячне світло.

Ми побачимо значніші відмінності, коли джерелом світла замість нагрітого тіла слугує колба, наповнена газом, який світиться під протіканням електричного розряду. Такі трубки використовують в даний час для рекламних написів та при освітленні вулиць. Багато з цих газорозрядних ламп мають яскраво жовтий колір (натрієві лампи) або помаранчевий (неонові лампи) колір, є такі, що світяться білим світлом (ртутні), безпосередньо відмінним по відтінку від сонячного. Дослідження спектрів світла наведених джерел

показують, що в спектрах цих приладів є тільки окремі досить вузькі кольорові ділянки.

В останній час навчилися виробляти газорозрядні лампи, світло яких має спектральні складові, що дуже близькі до сонячного світла. Такі лампи зазвичай називають лампами денного світла.

У разі досліджування світла сонця або дугового джерела, що профільтровано крізь кольорове скло, то воно уявиться таким, що помітно відрізняється від початкового. Чоловіче око сприймає це світло як кольорове, при цьому спектральне дослідження виявить, що в такому спектрі немає або дуже слабкі доволі великі ділянки спектра джерела [1].

Джерела світла – один з товарів, що у великих обсягах виробляється людиною.

Щорічно випускається та реалізується кілька мільярдів ламп, левову частку поки складають лампи розжарювання, а також газорозрядні. Досить стрімко зростає випуск сучасних ламп - компактних люмінесцентних, газорозрядних високого тиску (натрієвих, метало галогенних). Досить великі перспективи в енергозбереженні, а також у дизайні освітлювання зупинок забезпечують світлодіодні освітлювачі. Відбуваються досить великі зміни у якості освітлювачів, які дають надію сподіватися, що освітлювачі у новому третьому тисячолітті перетворяться у важливий інструмент архітектора, проектувальника, а також звичайної творчої людини – як головної особи, що діє у епоху дизайну.

1.1.2 Класичні лампи розжарювання. У цих лампах вольфрамова спіраль, що розміщена в колбі, з якої викачане повітря, підігрівається дією електричного струму. За довгу 120-річну історію пристроїв розжарювання їх було створено нескінченно багато - від мініатюрних ламп до кишенькового ліхтаря до потужних прожекторних. Стандартна для ЛР (рис. 1.1) світлова віддача у діапазоні видимості 10 ... 15 лм/Вт виглядає не дуже переконливо у порівнянні з рекордними досягненнями ламп інших типів. ЛР здебільшого нагрівачі, аніж освітлювачі: більша частка електроенергії, що живить нитку розжарення,

перетворюється зовсім не в світло, а в теплоту. Таким чином суцільний спектр типової лампи розжарювання характеризується максимумом в інфрачервоній області та досить плавно спадає зі зменшенням довжини хвилі. Описаний спектр означає теплий тон випромінювання ( $T_{\text{кол}} = 2400 \dots 2700 \text{ K}$ ) за відмінній передачі кольору ( $R_a = 100$ ).

Строк служби ЛР, зазвичай, не перевищує 1000 годин, а це, по великому рахунку, дуже небагато.

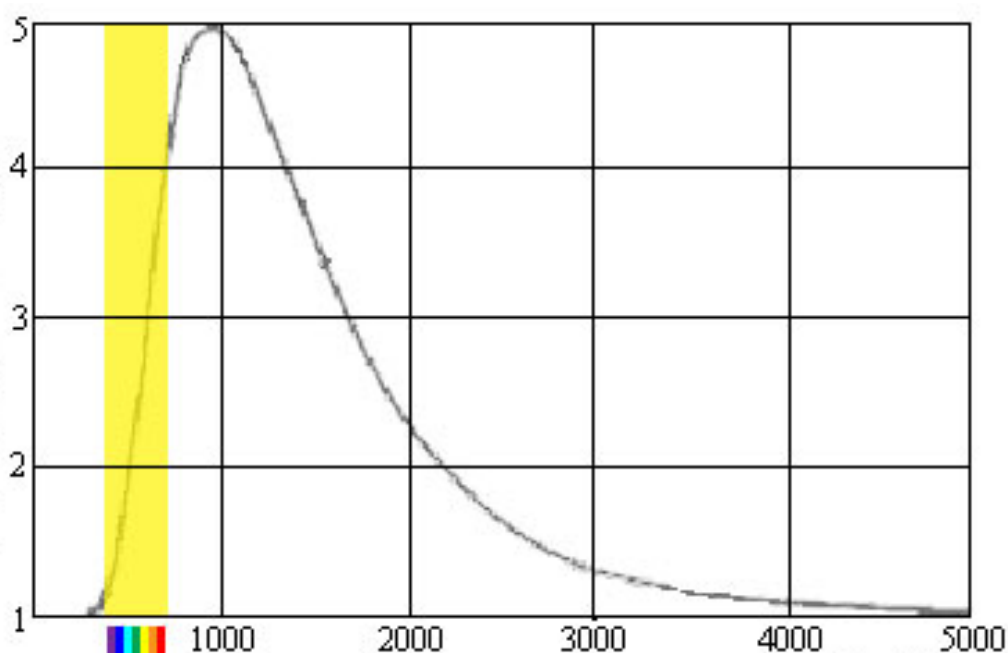


Рисунок 1.1 – Спектральна характеристика лампи розжарювання (інтенсивність в відносних одиницях від довжини хвилі в нм)

1.1.3 Галогенні лампи розжарювання (рис. 1.2). Головним недоліком звичайної лампи розжарювання є її мала світловіддача та її короткий термін служби. При наповненні її газами – галогенами, чи їх сполуками (до групи галогенів відносять хімічні елементи такі, як фтор, хлор, бром, йод і астат) можна уникнути утворення сажі на внутрішній стороні скляної колби, так що лампа протягом всього терміну служби буде випромінювати постійну світлову

енергію. Корисний ефект можна отримати за рахунок того, що пари галогенів можуть з'єднуватися з частками вольфраму, що випаровуються, а потім у результаті впливу високої температури розпадаються, таким чином повертаючи вольфрам на спіраль. Атоми вольфраму, що вилітають з розжареної спіралі, таким чином, не можуть долетіти до скляних стінок колби лампи (за рахунок чого і зменшується почорніння), та повертаються назад хімічним шляхом. Це явище має назву галогенного циклу.

Таким чином світловіддача і строк служби лампи значно збільшується. Якщо стандартна лампа розжарювання може мати світловіддачу 10 лм/Вт, галогенна лампа розжарювання легко досягає 25 лм/Вт. Окрім цього, галогенні лампи розжарювання можуть мати більш компактну конструкцію та придатні для більш витончених і особливих світильників.



Рисунок 1.2 – Галогенна лампа розжарювання

У відповідних магазинах сьогодні є в реалізації галогенні лампи розжарювання, призначені для використання з напругою мережі 220 В та лампи

для меншої напруги роботи: зокрема на 6, 12 і 24 В. Для низьковольтних галогенних ламп необхідно підключати трансформатор.

У разі декоративного контрастного освітлення все більше використовуються такі галогенні лампи, що відповідають потужності 10...50 Вт, та рефлекторні лампи обладнані відбивачами тліючого світла 20...75 Вт. В цих лампах дві третини тепла, що утворюється, відводиться назад за допомоги відбивача, який пропускає інфрачервоні промені, таким чином об'єкти, що освітлювані цими лампами, не вельми сильно нагріваються.

Розповсюдженим терміном служби мережевих , а також багатьох галогенних ламп низької напруги зазвичай вважають термін до 2000 годин. Як і у стандартних ламп розжарювання, механічний вплив в процесі експлуатації на лампи (для довгих ламп з великою довжиною спіралі особливо), а також більш термінові включення зменшують термін їх служби. Спектральні характеристики ламп розжарювання з галогеном наведені на рис. 1.3.

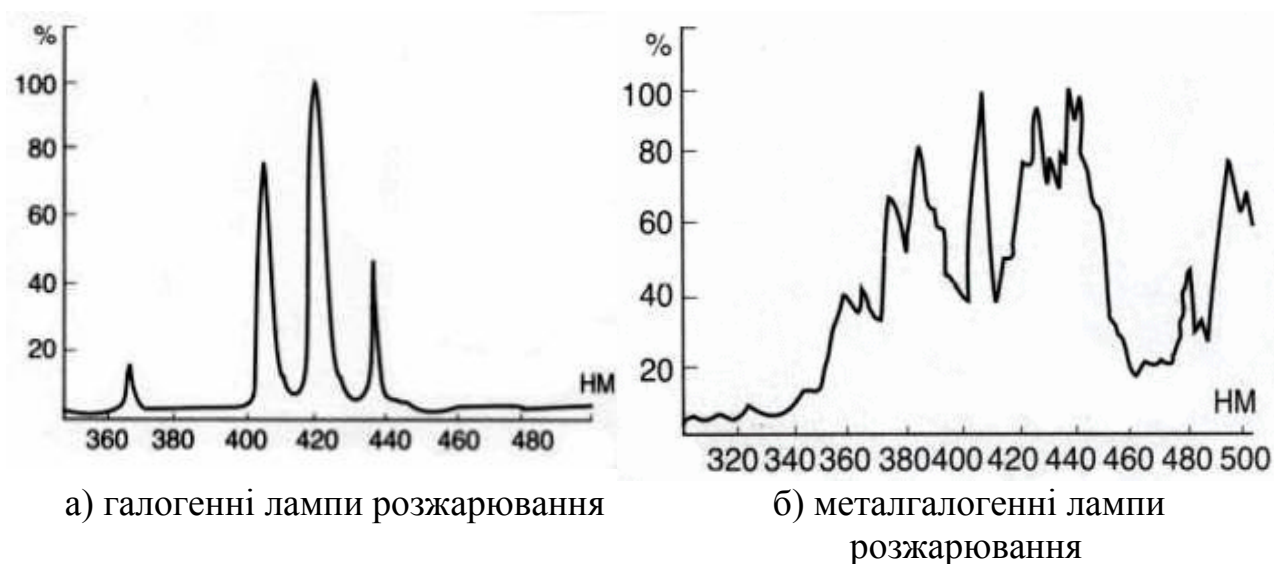


Рисунок 1.3 – Спектральні характеристики галогенних ламп розжарювання

Колірна температура наведених галогенних ламп, так як і реальна температура їх спіралі, вище, аніж у стандартних ламп розжарювання і складає

від 3000 до 3200 К. Це значення можна змінити за допомогою додаткових вбудованих чи зовнішніх світлофільтрів, підбором товщини інтерференційного шару покриття в лампах з дзеркальним шаром. Індекс Ra передачі кольору галогенних ламп, так як і всіх теплових світлових джерел, може бути максимальним і дорівнювати 100, що має місце за рахунок більш високої температури розжарення (якщо порівняти зі звичайними лампами розжарювання), випромінювання галогенних ламп відтворює краще сині та зелені кольори.

На сьогодні галогенні лампи є єдиним економічним порівняно та при цьому не дуже дорогим типом джерела світла з досить "теплим" спектром. Очевидно цим пояснюється їх широкий асортимент, що має тенденцію до подальшого розширення. В першу чергу такі лампи знаходять використання в функціонально-декоративному та побутовому освітленні [3].

1.1.4 Люмінесцентні лампи. З усіх розглянутих типів ламп люмінесцентні безумовно мають найвищу світловіддачу. Так звані люмінесцентні лампи з трьома стрічками за дуже хорошої світлопередачі досягають 96 лм / Вт, що майже в 10 разів більше, у порівнянні з лампою розжарювання. Тому такі лампи є хорошими джерелами заощадження електричної енергії, а таким чином і економічними. Основна область їх застосування – це промислові зони (майстерні, фабрики, заводські цехи, офіси і т.д.).

У люмінесцентних лампах (рис. 1.4) ми маємо генерацію світла за допомоги парів ртуті та люмінесцентного шару, нанесеного на внутрішній стороні поверхні колби лампи.

У якості випромінювачів слугують інертні гази, зокрема, неон, аргон або гелій. Збуджені електронами атоми ртуті всередині колби лампи виробляють невидиме для людини ультрафіолетове випромінювання, яке люмінофори перетворюють на видиме світло, у залежності від складу різні люмінофори дають різні кольори світіння і особливості передачі кольору.

Ефективність різних люмінофорів також відрізняється одне від одного. Точно таким же чином як і компактні люмінесцентні лампи, або так звані

енергозберігаючі лампи, так і звичайні люмінесцентні лампи працюють тільки з пускорегулюючим апаратом. І в цьому випадку Ви повинні купувати лампи тільки з електронним пускорегулюючим блоком.

Люмінесцентні лампи пристосовані до так званої оптимальної навколишньої температури, яка зазвичай збігається з кімнатною (18-25°C). За менших або більших температурах ми маємо те, що світловіддача лампи падає. У разі якщо навколишня температура нижче +5°C, включення лампи взагалі не відбувається. З цією особливістю виникають обмеження, накладені на застосування таких ламп у зовнішньому освітленні [2].

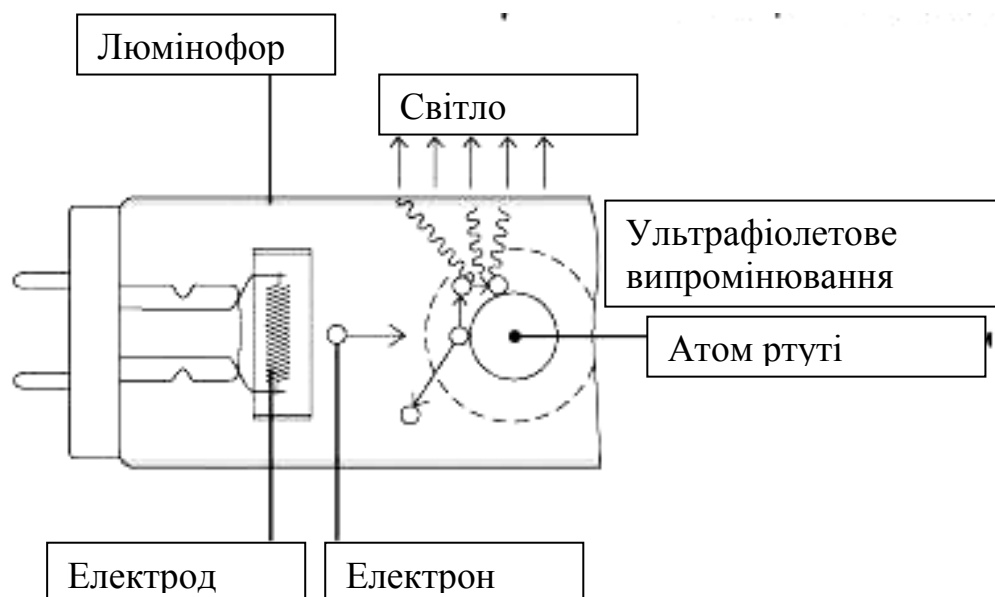


Рисунок 1.4 – Схема роботи люмінесцентної лампи

Термін служби люмінесцентних ламп залежить від багатьох факторів і сильно залежить від якості їх виготовлення. Лампа фізично горить, коли активний шар пошкоджений або електрод зламається. Найпотужніша розпилення електродів відбувається при загорянні лампи, що часто скорочує термін експлуатації після включення. Термін служби визначається як період, протягом якого лампа забезпечує щонайменше 70% вихідного світлового потоку. Цей час може закінчитися задовго до загорання лампи. Середній час

життя сучасних люмінесцентних ламп становить від 8000 до 15000 годин, залежно від моделі.

Люмінесцентні лампи охоплюють практично весь діапазон кольорових температур від 2700 до 10000 К. Існують також кольорові лампи. Індекс кольоропередачі Ra становить від 60 для стандартних люмінесцентних ламп до 92 до 95 для дуже хороших кольорів. Покращене відтворення кольорів означає незначне зменшення світловіддачі.

Функціональними властивостями люмінесцентних ламп є миготіння світлового потоку з частотою електромережі та його зникненням протягом періоду використання. Мерехтіння лампи не вдається виявити в оці, але це впливає на втому зорової частини мозку. Таке освітлення не підходить для напруженої візуальної роботи (читання, письмо тощо) і може мати миготливий вплив на обертові предмети. Електронні баласты повністю усувають цю проблему, і тепер їх можна рекомендувати для більшості застосувань.

На сьогоднішній день на ринку внутрішнього освітлення громадських будівель домінує люмінесцентне освітлення. Незважаючи на свого швидкозростаючого конкурента - світлодіодних систем, традиційні люмінесцентні лампи продовжуватимуть себе залишатись на довгі роки. Нещодавно також спостерігається тенденція до активного проникнення флуоресцентного світла в домашні та дизайнерські програми. Раніше цей процес був обмежений переважно недоліками дизайну та малоїмовірними кольорами у старих конструкціях світильників [3]. - Спектральні характеристики ртутних ламп показані на рис.(1,5).

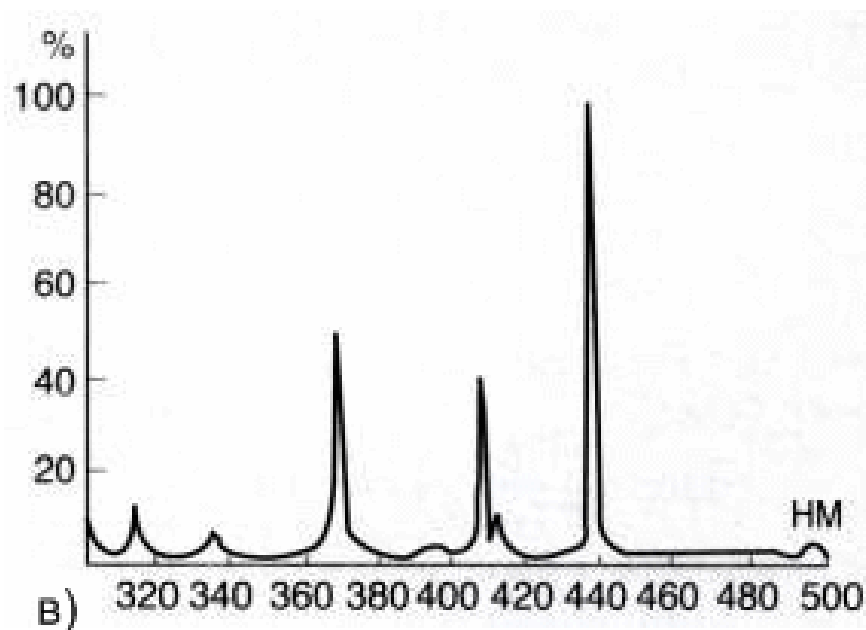


Рисунок 1.5 – Спектральна характеристика ртутної люмінесцентної лампи

1.1.5 Розрядні лампи високого тиску. Сутність дії розрядних ламп високого тиску - випромінювання наповнювача в розрядній трубці за рахунок дугових електричних розрядів. Такі розрядні лампи набагато раніше ламп розжарювання, у 2018 році електричній дузі виповнилося 200 років. Маємо 2 основних розряду високого тиску, що застосовують в лампі - ртутний і натрієвий. Вони дають досить вузькосмугове випромінювання: щодо ртутного - в блакитній області спектра, щодо натрію - в жовтій, тому передача відповідного кольору ртутних ( $R_a = 40 \dots 60$ ) а також натрієвих ламп ( $R_a = 20 \dots 40$ ) має бажати кращого. Додаток усередину робочої трубки ртутної лампи парів галогенідів та різних металів дало змогу створити новий клас джерел видимого світла - металогалогенні лампи (МГЛ), що на відміну відрізняються вельми широким спектром світіння і гарними параметрами: висока світлова ефективність (до 100 лм/Вт), добра і відмінна трансляція кольору  $R_a = 80 \dots 98$ , інтервал  $T_{cv}$  від 3000 К до 6000 К, середній строк служби приблизно 15 000 годин [4]. Спектральна характеристика такої розрядної лампи наведена на рис. 1.6.

Один з декількох недоліків МГЛ – не дуже висока стабільність параметрів впродовж терміну експлуатації - потроху долається з винаходом ламп, обладнаних керамічним пальником. МГЛ успішно та широко застосовуються в міському, ландшафтному, промисловому і спортивному освітленні. Ще ширше та у більшій кількості застосовуються натрієві лампи. На останній час це один з найбільш ефективних джерел світла (до 150 лм / Вт).

Неперевершена кількість натрієвих ламп розміщена для освітлення автомобільних та пішохідних доріг.

Натрієві лампи позначають аббревіатурою ДНаТ (що має сенс дугова натрієва трубчаста) і поділяють на лампи низького і високого тиску.

Натрієві лампи мають і недоліки. Ці лампи особливо низького тиску залежать від зовнішнього впливу: при настанні холодів їх характеристики значно погіршуються. Водночас в натрієвих лампах високого тиску присутні пари ртуті, що не забезпечує їм екологічності. Окрім цього, перевага червоного спектру у світлі лампи ДНаТ дещо спотворює загальну картину бачення освітлюваних об'єктів.

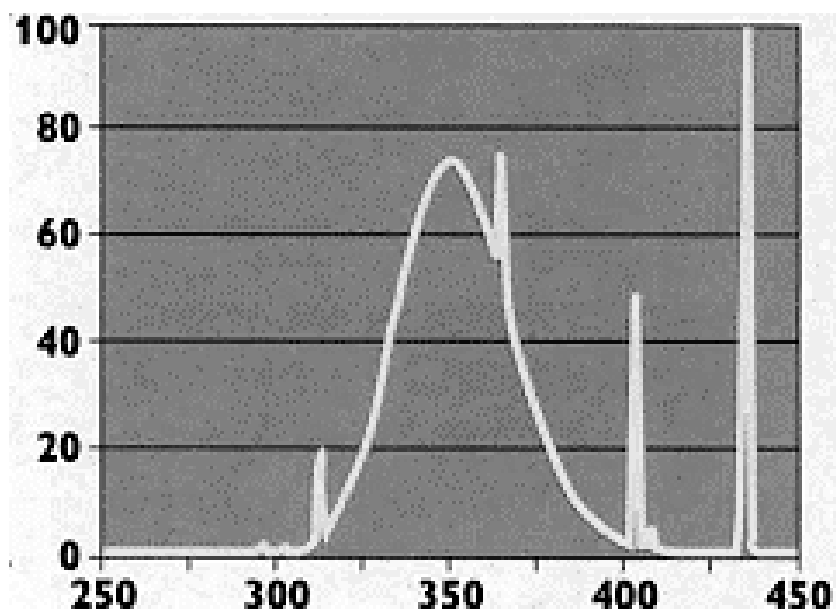


Рисунок 1.6 – Спектральна характеристика розрядної лампи високого тиску  
(у % відносно довжини хвилі)

1.1.6 Індукційні лампи. Так звана індукційна лампа – різновид ламп, що не мають електродів, принцип дії яких заснований на електромагнітної індукції та поєднаному газовому розряді, що генерує видиме світло. Основною відмінністю від розповсюджених газорозрядних ламп є безелектродна конструкція – лампа не має термодатодів і ниток розжарення, що суттєво збільшує строк служби.

Індукційна лампа побудована з трьох частин: основними є газорозрядна трубка, внутрішня поверхня якої покрита люмінофором, магнітне кільце чи стрижень (ферит) з індукційною котушкою, також електронного баласту (високочастотного джерела струму). По виду індукції існують два типи побудови індукційних ламп:

- зовнішня індукція: навколо трубки розташоване магнітне кільце;
- внутрішня індукція: магнітне осердя розташоване у середині колби.

Два варіанти конструкції індукційних ламп за засобом розміщення електронного баласту:

- індукційна лампа з підключеним окремим баластом (електронний баласт та лампа, що рознесені як окремі елементи);
- індукційна лампа з унутрішньо вбудованим баластом (електронний баласт знаходяться в одному корпусі з лампою).

Електронний баласт забезпечує високочастотний струм, який протікає по індукційній котушці з магнітним кільцем або стрижні. Електромагніт та індукційна котушка формують газовий розряд у створеному високочастотному електромагнітному полі, та під дією ультрафіолетового випромінювання газового розряду маємо світіння люмінофора. Конструктивно і за принципом функціонування лампа нагадує трансформатор, цю якому є первинна обмотка де протікає високочастотний струм і вторинна обмотка, що являє собою газовий розряд, який відбувається в скляній колбі.

Основні характеристики:

- доволі тривалий термін служби: 60 000 – 150 000 год.(завдяки побудові без електродів термін дії значно вище, ніж у стандартних джерел світла);

- номінальна світловіддача:  $> 80$  лм/Вт;
- ефективна світловіддача (у видимому діапазоні): 120...180 лм/Вт;
- досить високий рівень світлового потоку навіть після тривалого використання (наприклад, після 60 000 годин розмір світлового потоку становить більше 70% від початкового);
  - висока ефективність: при однаковій освітленості лампа споживає на 30-50% менше енергії, ніж металогалогенна лампа, та на 40-60% у порівнянні з натрієвою лампою, та в 11-12 разів ефективніше, аніж лампа розжарювання;
  - відсутні термокатоди, що потрібно гріти.

## 1.2 Напівпровідникові джерела випромінювання

1.2.1 Напівпровідникові індикатори працюють на явищі люмінесценції, що зумовлена рекомбінацією електронів і дірок за їх інжекції під дією подачі напруги на р-n-переході. Спектр видимого випромінювання світлодіодів (ППІ) лежить у межах хвиль 0,4-0,7 мкм. Якість перетворення електричної енергії в світло визначається параметрами матеріалу напівпровідника, коефіцієнтом корисної дії процесу інжекції неосновних носіїв, оптичними втратами в товщі напівпровіднику та іншими факторами.

ППІ можна характеризувати рядом переваг в порівнянні з відомими іншими типами індикаторів:

- досить великий термін служби;
- порівняльна сумісність з інтегральними мікросхемами, завдяки низьким напруженням і струмам, що споживаються;
- досить висока надійність за умови ударних і вібраційних перевантажень;
- порівняна компактність;
- дуже мала інерційність ППІ дає високу швидкодію (50 ... 200 нс).

В останні роки ППІ, що випускаються промисловістю, в основному виготовляються на базі твердих розчинів GaAsP та GaP. Це дає можливість

отримання широкого діапазону світіння ППІ від червоного до фіолетового кольору [1].

Залежність параметрів світла від довжини хвилі оптичного випромінювання (або від частоти випромінюваних фотонів) називають спектральною характеристикою ППІ.

Довжина хвилі випромінювання пов'язана з різницею двох енергетичних рівнів, між якими має місце перехід електронів у процесі люмінесценції.

Довжина хвилі  $\lambda_{\max}$  випромінювання ППІ визначається за формулою:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E} = \frac{1,23}{E}, \quad (1.1)$$

де  $h$  – стала Планка;

$c$  – швидкість світла;

$E$  – ширина забороненої зони.

Коефіцієнт 1,23 вірний, якщо  $\lambda_{\max}$  вимірюється в мкм, а  $E$  – в еВ.

У зв'язку з різним значенням ширини забороненої зони у різних матеріалів довжина хвилі випромінювання відрізняється в різних типах ППІ. Приклади спектральних характеристик світлодіодів на основі GaP і SiC з різними домішками наведені на рис. 1.7.

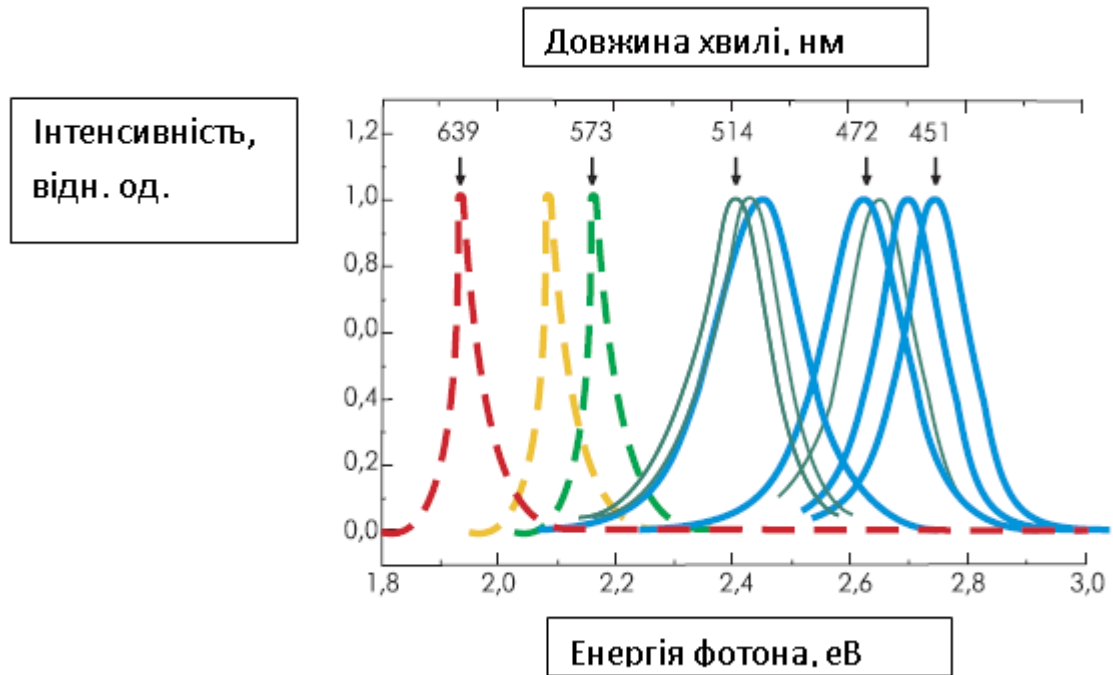


Рисунок 1.7 – Спектри електролюмінесценції InGaN/AlGaIn/GaN (безперервні лінії) та AlInGaP/GaP (штрихові)

Оскільки перехід електронів за рекомбінації носіїв заряду зазвичай відбувається не між двома енергетичними рівнями, а між двома групами енергетичних рівнів, то спектр випромінювання виявляється дещо розмитим. Спектральний діапазон (рис. 1.7) СВД характеризується шириною спектра випромінювання  $\Delta\lambda_{0,5}$ , який вимірюють на висоті 0,5 максимуму амплітуди характеристики.

Випромінювання більшості СВД здебільш близько до монохроматичного ( $\Delta\lambda / \lambda_{\max} \ll 1$ ) а також має відносно високу спрямованість випромінювання (розподілу потужності в просторі).

Незважаючи на те, наскільки ефективний СВД, вихідне випромінювання навіть досить великої потужності не може бути зафіксовано, якщо довжина хвилі випромінювача не відповідає спектру приймача випромінювання (на який реагує фотоприймач). У переважній більшості випадків застосування випромінювач СВД має бути спектрально узгоджений або з характеристикою людського ока, або з відповідним фотоприймачем. Діапазон спектральної

чутливості кремнієвого приймача становить приблизно 300 ... 1100 нм. Людське око має більш вузький діапазон чутливості з практично чутливою областю 400 ... 700 нм. Для більш ефективної роботи системи випромінювач - приймач варто ретельне узгодження відповідних спектральних характеристик приладів.

Наприклад, за узгодження з людським оком СВД на основі GaAsP узгодження практично забезпечується вибором довжини хвилі, за якої здобуток відносної ефективності ока  $V(\lambda)$  та квантового виходу СВД  $\eta(\lambda)$  буде максимальним, тобто :

$$V(\lambda) \eta(\lambda) = \max. \quad (1.2)$$

Цей максимум очевидно досягається при  $\lambda=655$  нм відповідно червоний колір випромінювання.

В СВД, що мають коротші довжини хвиль випромінювання (наприклад, з  $\lambda_{\max}=565$  нм (зелений колір) і  $\lambda_{\max}=585$  нм (жовтий колір)), значення  $\eta$  істотно нижче, аніж у СВД червоного кольору. Однак відносна чутливість ока за такої довжині хвилі значно більше.

В результаті можливо отримати набір випромінювачів у діапазоні від червоного до зеленого кольору світла, що мають одне і те ж саме значення здобутку  $V(\lambda) \eta$  (з точністю до порядку величини).

Світлодіодні джерела мають високу економічність енергоспоживання, також є екологічно чистими та не вимагають особливо спеціальних умов щодо обслуговування. Згідно заяв виробників термін служби їх значно перевищує існуючі аналоги (близько 80 тис. годин у деяких моделей, що відповідає 20-25 років експлуатації).

Проте світло, що випромінюють діоди, порівняно з натрієвими лампами більш холодне. Крім того ж, іноді ділянка, освітлена світлодіодами, вдається багатьом людям більш темною.

З точки зору так званої світловіддачі (співвідношення випромінюваного світлового потоку відносно споживаної потужності, що вимірюється в люменах на Ватт – лм/Вт) натрієві лампи низького тиску випереджають СВД: 200 лм/Вт проти 150 лм/Вт у діодів.

По параметру мінімізації витрат електроенергії СВД немає рівних. Енергоспоживання подібної за характеристиками світлодіодної лампи буде майже втричі менше, ніж у натрієвого конкурента.

На відміну від ртутної лампи, натрієві прилади низького тиску і СВД не містять небезпечних речовин. Чого не скажеш про натрієву лампу високого тиску, хоч останнім часом у цій сфері ведуться роботи у напрямку зменшення вмісту ртуті.

Стосовно заявленого терміну служби діоди явно попереду. За даними різних виробників, світлодіоди, що працюють на вулиці, служать в 5-10 разів довше за своїх конкурентів.

Що стосується вартості виготовлення, а також експлуатації, то діодні лампи, хоч і коштують дорожче, не вимагають складного обслуговування протягом всього строку служби, оскільки вони нерозбірні. Щоб світильник дійсно відслужив заявлений термін, треба забезпечити відповідну якість виготовлення, встановлення та експлуатації.

1.2.2 Лазер. Порівняльно з іншими джерелами світла лазер має декілька унікальних властивостей, пов'язаних з його значною когерентністю та високою спрямованістю випромінювання. Випромінювання інших джерел світла не має цих особливостей. Енергія, випромінювана нагрітим тілом, пов'язана з його температурою  $T$ . Найбільш можливе значення потужності випромінювання, що досягається для абсолютно чорного тіла,  $W = 5,7 \times 10^{-12} \times T^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Потужність випромінювання порівняно швидко зростає із збільшенням  $T$ , та за високих  $T$  сягає дуже значних величин. Наприклад, кожний 1 см<sup>2</sup> поверхні Сонця ( $T = 5800$  К) випромінює потужність  $W = 6,4 \times 10^3$  Вт. Але випромінювання теплового джерела зазвичай поширюється по всіх напрямках відносно джерела, таким чином заповнює тілесний кут  $2\pi$  радіан. Формування досить

спрямованого пучка такого джерела, здійснюють за допомоги системи діафрагм або оптики, що складаються з набору лінз і дзеркал, що завжди супроводжується втратою енергії. Ніяка оптична система не може отримати на поверхні, що освітлюється потужність світла більшу, ніж в самому джерелі випромінювання.

## 2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 2.1 Імітатор спектральних приладів

Спектральні прилади відмінні методами спектрометрії, приймачами випромінювання, діапазоном довжин хвиль, що досліджується (робітником) та іншими характеристиками.

Принцип дії більшості таких спектральних приладів можна імітувати за допомогою так званого імітатора, зображеного на рис. 2.1.

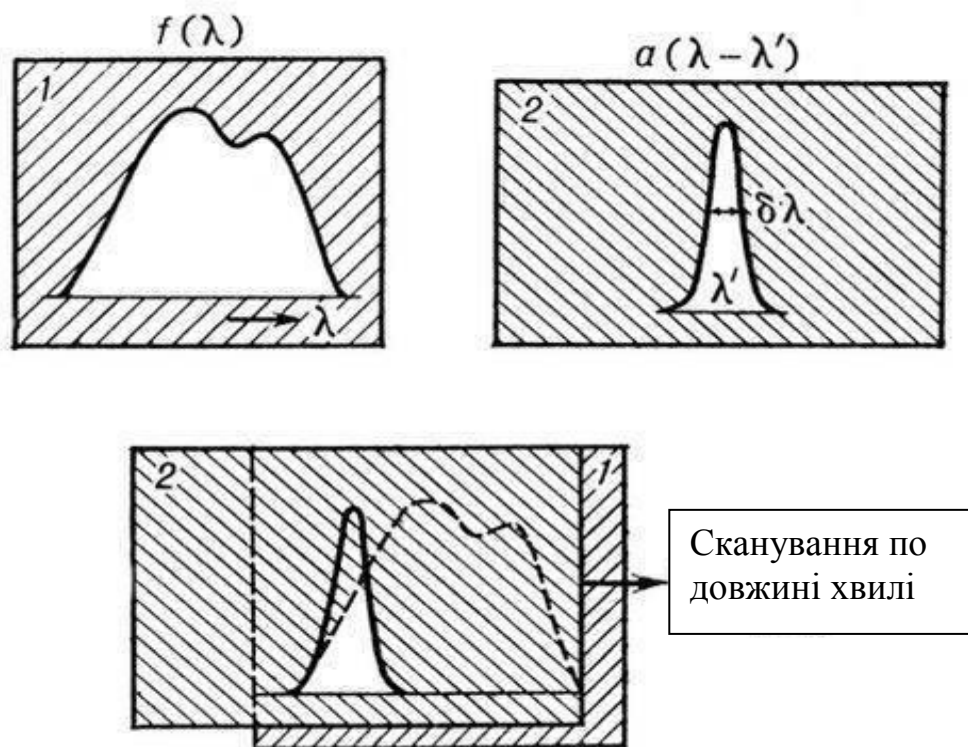


Рисунок 2.1 – Імітатор спектральних приладів

Форма отвору в досить рівномірно освітленому екрані 1 відповідає функції  $f(\lambda)$ , що описує досліджуваний спектр - енергетичний розподіл випромінювання згідно довжини хвилі ( $\lambda$ ). В екрані є отвір 2, що відповідає функції  $a(\lambda - \lambda')$ , що описує спектральну здатність приладів виділяти із потоку світла вузькі ділянки  $d\lambda$  поблизу околиці кожної  $\lambda'$ . Цю важливу характеристику

спектральних приладів іменують функцією пропускання, або апаратною функцією (АФ). Процес вимірювання спектру  $f(l)$  пристроєм з АФ а  $(l-l')$  мітуємо, реєструючи світловий потік, що проходить крізь отвір, за зміщення (сканування) екрану 2 впродовж екрану 1. Очевидно, що чим менше ширина АФ, тим з більшою точністю буде виміряно форму розподілу спектру  $f(l)$ , тим більш тонша структура буде в ньому виявлено.

Розмір АФ поряд з робочим діапазоном  $l$  становлять основні характеристики спектральних приладів, вони визначають спектральний дозвіл  $dl$  та спектральну роздільну здатність приладу  $R = 1 / dl$ . Якщо ширше АФ, то гірше дозвіл ( $i$  менше  $R$ ), але потік випромінювання більше, що прилад пропускає. Збільшується оптичний сигнал та  $M$  - співвідношення сигнал / шум. Шуми (випадкові перешкоди), що мають місце в будь-яких вимірювальних приладах, взагалі пропорційні  $Df$  - смузі пропускання приймального приладу. Ширше  $Df$ , то більше швидкодія пристрою і менше інтервал вимірювання, але більше шуми [5].

Показники функцій  $a$  і  $b$  мають різні позитивні рівні значення в залежності від наведеного типу спектрального приладу.  $K$  – стала, що залежить тільки від довжини  $l$ , та визначається конструктивними параметрами даного виду спектрального приладу та накладає деякі обмеження на значення  $R$ ,  $M$ ,  $Df$ . Крім того, можливі значення  $R$  дещо обмежуються дифракцією світла, а також аберацією оптичних систем, а значення  $Df$  обмежено інерційністю приймально-реєструючої частини спектрального блоку.

Розглянуте (рис. 2.1) явище та принцип дії спектрального приладу можна віднести до одноканальних методів спектрометрії. Також з ними широко поширені так звані багатоканальні методи, в яких процес сканування не застосовується. Випромінювання різних видів  $l$  реєструються одночасно. Це дорівнює накладенню на екран 1 сталого екрану з вирізаними  $N$  отворами АФ для відмінних  $l$  за незалежної реєстрації потоків світла від кожного каналу (отвору).

## 2.2 Методи спектрометрії

Загальна класифікація методів спектрометрії, які є основою різних схем та конструкцій спектральних приладів, наведена на рис. 2.2.

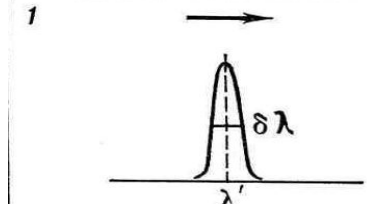
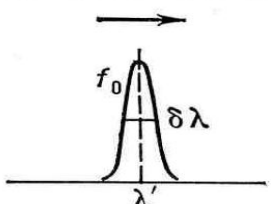
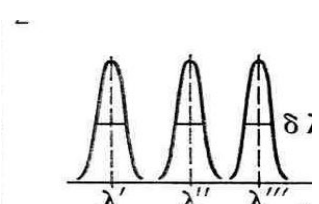
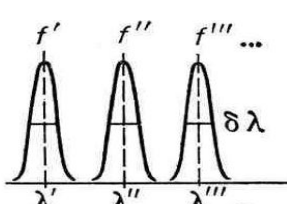
		Методи розділення довжин хвиль	
		Селективна фільтрація (класичні методи)	Селективна модуляція (нові методи)
Одноканальні прилади	 <p>Спектрометри з клиновими фільтрами Спектрометри з монохроматорами Спектрометри Фабрі-Перо</p>	 <p>Растрові спектрометри Спектрометри СІСАМ</p>	
Багатоканальні прилади	 <p>Спектрометри з набором фільтрів Спектрометри з поліхроматорами Спектрографи</p>	 <p>Мультиплекс-спектрометри Адамар-спектрометри Фур'є-спектрометри</p>	

Рисунок 2.2 – Загальна класифікація методів спектрометрії

Дана класифікація згідно за двома основними ознаками — кількістю каналів та фізичними методами виділення  $l$  у просторі або часі. В історії першими і найбільш поширеними методами є методи селективної фільтрації  $l$

(просторового поділу), що називають "класичними" (групи 1 і 2 на рис. 2.2). В одноканальних спектральних приладах (група 1) потік, досліджуваний зі спектром  $f(l)$ , надається на спектрально-селективний фільтр, що виділяє з потоку певні інтервали  $dl$  поблизу кожної  $l'$  та може змінюватись (безперервно або дискретно), здійснюючи сканування необхідного спектра в часі за деяким законом  $l'(t)$ . Виділені компоненти  $dl$  надходять на приймач випромінювання, що записує сигнал, та дає функцію  $F(t)$ . Перехід від аргументу  $t$  до аргументу  $l$  таким чином дає функцію  $F(l)$  — спостережуваний спектр.

В багатоканальних спектральних приладах (група 2) наявна інформація про досліджуваний спектр виходить шляхом одночасної реєстрації (без сканування  $l$ ) декількома приймачами потоків світла різних довжин хвиль ( $l', l', l', \dots$ ). Вони виділяються, наприклад, набором вузькосмугових фільтрів або багатощільовими монохроматорами (поліхроматорами). Якщо інтервал між каналами не перевищує  $dl$  та кількість каналів  $N$  достатньо велика, одержувана аналогічна інформація загалом міститься в запису спектра на скануючому одноканальному приладі (за тих же  $dl$ ), однак час вимірювання може бути зменшено в  $N$  разів. Більша багатоканальність досягається за допомоги багатоелементних фотоелектричних приймачів світлового випромінювання і фотографічних матеріалів (у спектрографах).

Принциповою основою "нових" методів (групи 3 і 4 в табл. 2.1), які одержали розвиток з середини 60-х років., є селективна модуляція, тобто функція поділу  $l$  переходить з оптичної в електричну частину блоку[6].

У найпростішому одноканальному приладі наведеної групи 3 досліджуваний потік, що має спектр  $f(l)$ , надсилається на спектрально-селективний пристрій - модулятор, здатний модулювати з деякою частотою  $f = \text{const}$  тільки інтервал  $dl$  в околиці  $l'$ , залишаючи останок потоку немодульованим. Сканування  $l'(t)$  ведеться перебудовою модулятора таким чином, щоб деякі різні  $l$  модулювались послідовно з частотою  $f_0$ . Виділяючи складову  $f_0$  в сигналі приймача за допомоги фільтра, можна отримати функцію

$F(t)$ , розмір значень якої пропорційний відповідним інтенсивностям у спектрі  $f(l)$ .

Багатоканальні системи з відповідною селективною модуляцією (група 4) базуються на операції мультиплексування (multiplexing). Це означає одночасний прийом випромінювання від багатьох спектральних елементів  $dl$  в дещо кодованій формі одним приймачем. Це пов'язано з тим, що довжини хвиль  $l, l', l'', \dots$  одночасно модулюються різними частотами  $f, f', f'', \dots$  та суперпозиція відповідних світлових потоків в приймачі випромінювання видає складний сигнал, у якого частотний спектр  $f$  має інформацію про досліджуваний спектр  $l$ . За невеликої кількості каналів компоненти  $f, f', f'', \dots$  виділяються з даного сигналу за допомоги електричних фільтрів. В міру зростання числа каналів гармонічний аналіз заданого сигналу ускладнюється. У деякому випадку інтерференційної модуляції необхідний спектр  $f(l)$  можна отримати Фур'є-перетворенням вихідної реєстрованої інтерферограми. Щодо інших можливих способів багатоканального кодування, практичне застосування отримали маски-матриці Адамара.

За межами класифікації, наведеної на рис. 2.2, залишаються лише методи, які використовують квазімонохроматичне випромінювання перебудованих лазерів.

Всі групи методів спектрометрії, що розглянуті, знайшли практичне втілення в різних конструкціях спектральних приладів, та відносна поширеність їх різна. Розглянемо типи спектральних приладів, що найбільш поширені, дотримуючись наведеної класифікації.

### 2.3 Одноканальні спектральні прилади

В основі схеми приладів цієї групи (рис. 2.3) покладено диспергуючий елемент (інтерферометр Фабрі - Перо, призма, дифракційні ґрати), що має кутову дисперсію  $D_j / D_l$ .

Прилад дозволяє розгорнути в фокальну площину вихідне зображення вхідної щілини в випромінюванні для різних довжин хвиль. Об'єктиви  $O_1$  і  $O_2$  слугують сферичні або параболічні дзеркала. Фокусні відстані цих елементів не залежить від  $\lambda$  (в відмінну до лінзових систем).

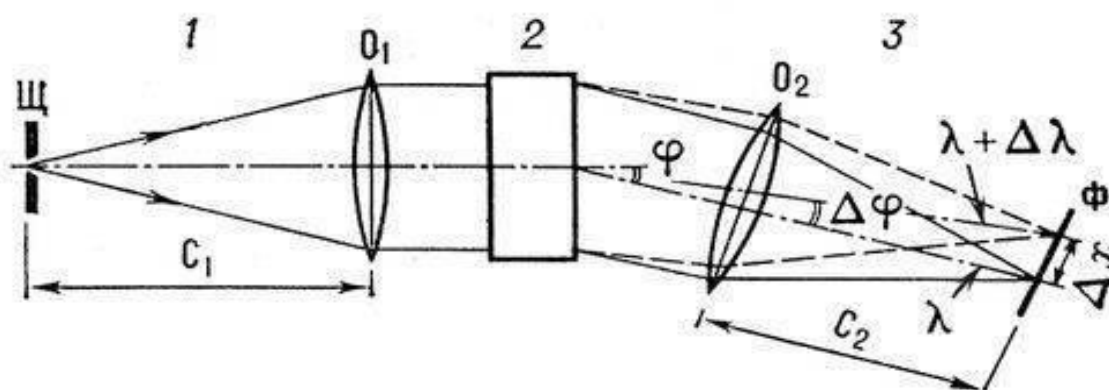


Рисунок 2.3 – Схема одноканального спектрального приладу з просторовим розділенням довжин хвиль

Одноканальні схеми мають розміщену у фокальній площині одну вихідну щілину та їх називають монохроматорами. Сканування по  $\lambda$  виконується, зазвичай, поворотом диспергуючого елемента або додаткового дзеркала. У найпростіших монохроматорах крім решіток і призм застосовуються циркулярно-клинові світлові фільтри з безперервною перебудовою смуги пропускання та набори вузькосмугових світлофільтрів, які дають декілька дискретних відліків для різних довжин  $\lambda$  [7].

На базі монохроматорів побудовані однопроменеві та двопроменеві спектрометри. у разі однопроменевих спектральних приладів (рис. 2.4) використовують послідовне з'єднання функціональних елементів.

Для вимірювання спектрів пропускання чи відбиття зазвичай використовується у приладі вбудоване джерело безперервного спектра

випромінювання; щодо вимірювання спектрів зовнішніх випромінювачів повинно передбачати відповідні освітлювачі.

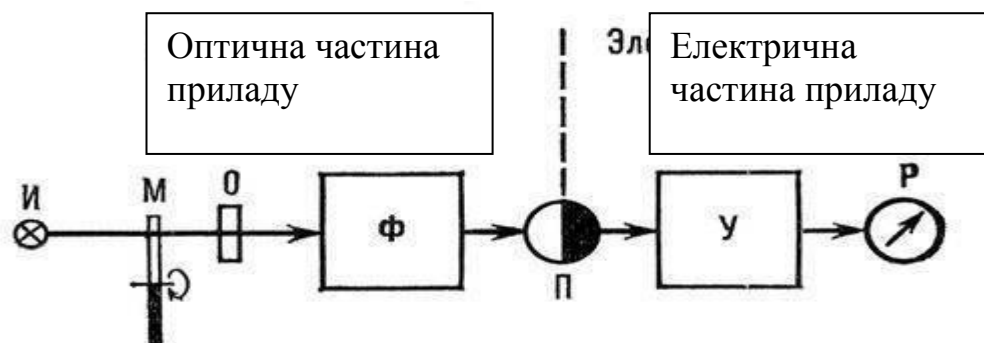


Рисунок 2.4 – Однопроменевий спектральний прилад

Спектрометри з високим дозволом для досліджень структури атомних та молекулярних спектрів – це стаціонарними лабораторні установки, які працюють за схемою, що наведена на рис. 2.4. Їх досить довгофокусні (до 6 м) монохроматори розташовуються у вакуумному корпусі (для усунення атмосферного поглинання) та розміщаються в віброзащитній і термостабілізованій камері. У цих приладах використовується 2- і 4-сильна дифракція на великих ґратках, також застосовують високочутливі охолоджені приймачі, таким чином це дозволяє досягати в спектрах поглинання величин  $R = 2 \times 10^5$  при  $l = 3$  мкм. Для виявлення більш тонкої структури використовують інтерферометри Фабрі - Перо, в яких сканування по  $l$  в вузькому діапазоні виконується зміною тиску в зазорі чи зміною величини зазору за допомоги пьезодвигунів. Щілинний монохроматор використовується тільки лише для попереднього вибору спектрального діапазону та розділення порядків інтерференції, що накладаються. Подібні прилади називаються спектрометрами Фабрі - Перо [9].

У двопроменевих оптичних приладах потік від джерела розбивається на два пучки - основний і допоміжний пучок порівняння (референтний). Частіше застосовується двопроменева схема так званого "оптичного нуля" (рис. 2.5), яка

представляє собою схему автоматичного регулювання із вбудованим зворотним зв'язком. У разі рівного розподілу потоки двох пучків фотометра, поперемінно посилюються модулятором на щілину (вхід) монохроматора, тоді система знаходиться в рівновазі, та клин нерухомий. За зміни довжини хвилі пропускання змінюється рівновага, та виникає сигнал розбалансу, що посилюється та подається на сервомотор, що керує рухом клину а також пов'язаним з ним реєстратором (самописцем).

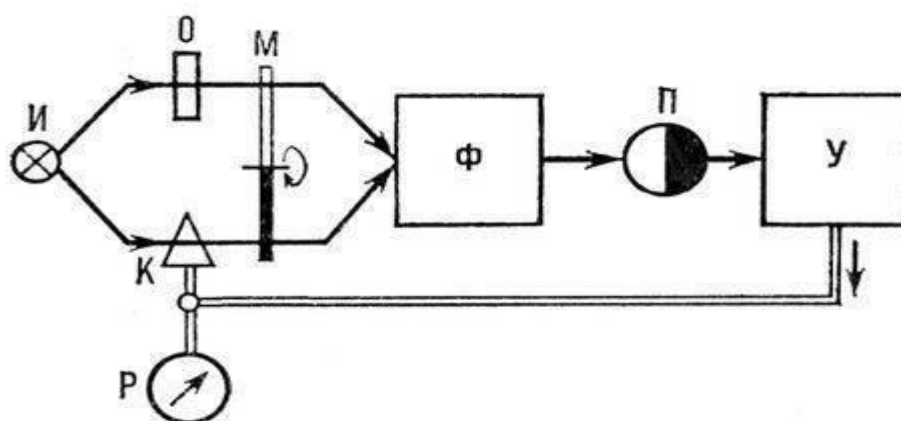


Рисунок 2.5 – Двопроменева схема «оптичного нуля»

Спектрометри комбінаційного розсіювання бувають одно- і двопроменевими. Їх джерелом випромінювання слугують лазери, з метою спостереження комбінаційних частот та придушення фону, що створюється первинним випромінюванням, застосовують подвійні і потрійні монохроматори, також і голографічні дифракційні ґрати. Прилади мають пристрої для спостереження комбінаційного розсіювання в порошках, рідинах, кристалах під різними кутами.

## 2.4 Багатоканальні спектральні прилади

У цій групі приладів сканування не застосовується, замість цього дискретний ряд довжин хвиль (у поліхроматорі) та ділянки безперервного спектру (у спектрографі) реєструються одночасно, та оптична частина побудована подекуди за схемою, наведеною на рис. 2.3. Можливо замість системи, яка створює кутову дисперсію, застосовують набір вузькосмугових фільтрів світла, тоді прилад відносять до фотометрів.

Спектрографи одномоментно реєструють великі ділянки спектра, розтянутого в фокальній площині (рис. 2.3) на фіксуєчих середовищах або фотоплівках, на екранах спеціалізованих телевізійних трубок, фотоелектронних оптичних перетворювачів з "запам'ятовуванням" зображення.

За доброї оптики число каналів обмежено лише роздільною здатністю (зернистістю) вживаних фотоматеріалів та числом рядків телевізійної розгортки. В області спектра що застосовується для візуальних спектральних методів аналізу досить широко використовують звичайні спектроскопи та стилоскоп, особливістю яких є те, що приймачем є око.

Високошвидкісні багатоканальні спектральні прилади, що потрібні для досліджень спектрів швидких процесів виконують шляхом поєднання спектрографа зі надшвидкісною кінокамерою (кіноспектрографи), та введенням у схему блоку багатогранних обертових дзерка, що необхідні для розгортки спектрів у напрямку перпендикулярно дисперсії, та застосування багатоканальної реєстрації процесів з багатоелементними приймачами [8].

Растрові спектрометри створюють по загальній для таких спектральних приладів одноканальній блок-схемі (рис. 2.4), причому в скануючому монохроматорі замість щілини маємо растри спеціальної форми. Робота вхідного растру в прохідному та відбитому світлі поперемінно втілюється у амплітудній модуляції випромінювання тієї моди, для якої наявне зображення вхідного растру практично збігається з вихідним растром.

### 3 СВІТЛОДІОДНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### 3.1 Конструкції та основні параметри світлодіодів

Світлодіод або світловипромінювальних діод (рис. 3.1) являє собою напівпровідниковий прилад, який випромінює некогерентне світло за умови пропускання через нього постійного струму. Світло, що випромінюється, належить до вузького діапазону спектра, його колірні параметри залежать від питомого хімічного складу напівпровідника, використаного в ньому.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд світлодіода

Напівпровідникові світловипромінюючі прилади - світлодіоди - називають джерелами світла майбутнього. Якщо говорити про сучасний стан «твердотільної світлотехніки», можна констатувати, що вона виходить з періоду дитинства. Досягнуті характеристики світлодіодів (для білих світлодіодів світлова віддача до 25 лм / Вт при потужності приладу до 5 Вт,

$R_a = 80 \dots 85$ , термін служби 100 000 годин) вже забезпечили лідерство в світлосигнальній апаратурі, автомобільної і авіаційної техніки. Світлодіодні джерела світла стоять на порозі вторгнення на ринок загального освітлення, і це вторгнення нам доведеться пережити в найближчі роки.

Якщо порівнювати з іншими електричними джерелами випромінювання (перетворювачами електричної енергії у електромагнітне випромінювання видимого діапазону), згадані світлодіоди мають наступні відмінності:

- досить високий ККД. Світлодіоди на цей час поступаються за цим параметром лише люмінесцентній лампі з холодним катодом;

- достатня механічна міцність, стійкість до ударів (відсутність спіралі чи інших чутливих складових);

- вельми тривалий термін служби. Однак і він не є нескінченним - при тривалій роботі та недостатньому охолодженні має місце «отруєння» кристала і поступове падіння потужності;

- особливий спектральний склад випромінювання. Вимірюваний спектр приладу досить вузький. У разі потреб передачі даних це - перевага, але для освітлення це є недоліком. Тільки лазер має ще більш вузький спектр;

- мала інерційність перемикання;

- кут випромінювання може бути малий та більший, залежно від конструкції - також може бути перевагою або недоліком;

- низька вартість;

- відносна безпека - не потребує високої напруги;

- індиферентність до низьких температур. Але високі температури не підходять світлодіоду, як і будь-яким з напівпровідників.

Різноманітність світлодіодів в пластиковій оболонці синього, жовтого і червоного кольору представлено на рис. 3.2.

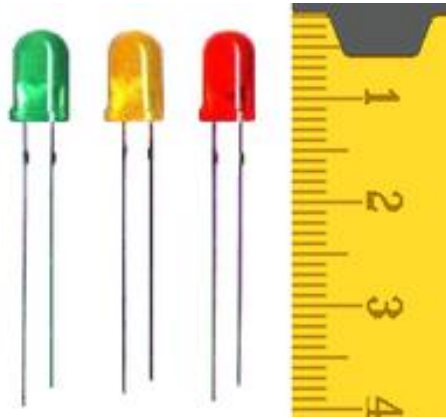


Рисунок 3.2 – Світлодіоди в пластиковім корпусі синього, жовтого і червоного кольору

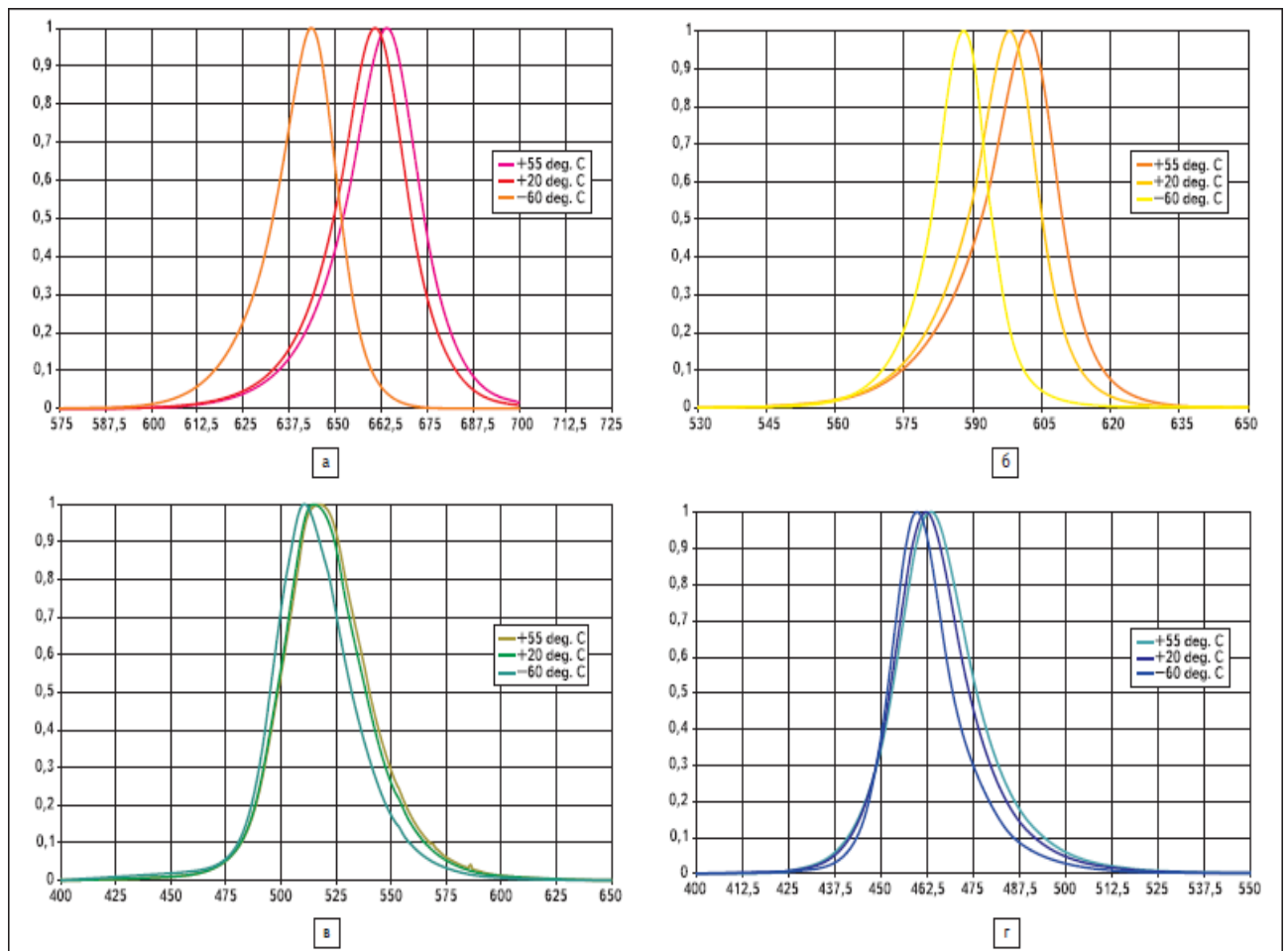
### 3.2 Колориметричні характеристики світлодіодів

Колориметрія — наукове вимірювання та визначення колірних характеристик світлодіодів. Колориметричні параметри світлодіодів зазвичай виражені в координати кольоровості або в довжинах хвиль. Колірне сприйняття людини дуже складно, оскільки вона залежить не тільки від різних фізичних властивостей світла, але також і від навколишніх об'єктів, механічних властивостей випромінювача, фізіологічного відгуку очі спостерігача і його психологічного стану.

Залежно колориметричних характеристик світлодіодів від зміни температури отримані методом вимірювання спектрального складу їх випромінювання з допомогою установки. Будучи інформативною і показовою частиною багатовимірної системи параметрів світлодіодів, ці залежності важливі як з практичної точки зору їх використання в пристроях, так і з точки зору визначення якісних показників випромінюючих структур або застосованих в тих чи інших світлодіодах кристалів.

З рис. 3.3 добре видно, як змінюється і спектр випромінювання зміщується при зміні температури. Наведені нижче графіки залежностей деяких

величин від температури розташовані в порядку зростання інформативності для візуальної оцінки випромінювання світлодіодів.



а) червоний

в) зелений

б) жовтий

г) синій

Рисунок 3.3 – Відносне спектральний розподіл випромінювання світлодіодів при різних температурах навколишнього середовища від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$

Для деякого пояснення варто розглянути рис. 3.4 з деталізацією спектра випромінювання синього світлодіода. Максимальна довжина хвилі  $L_{\text{max}}$  показує максимальну амплитудну складову спектра, по якій можна визначити положення піку функції спектрального розподілу на шкалі довжин хвиль. Довжина хвилі  $L_{\text{cen}}$  (центроїдного або центральна) більш інформативна і, будучи «центром мас» інтеграла функції  $F(\lambda)$ , може дати поняття про симетрії

кривої спектрального розподілу відповідно до того, наскільки вона відрізняється від  $L_{\max}$ . Ця відмінність позначить фактор неідеальності спектрального розподілу як наслідок порушення гауссовського розподілу переходів з різними значеннями  $E_g$ . В ідеальному випадку  $L_{\max}$  і  $L_{\text{sen}}$  співпадуть.

Найбільш часто в специфікаціях зустрічається напівширина спектра випромінювання за рівнем 0,5 від максимуму амплітуди. Ця величина виходить як різниця значень довжин хвиль правого і лівого спадів спектральної характеристики випромінювання, відповідних вказаним вище рівня амплітуди. Напівширина функції  $F(\lambda)$  дозволяє судити про склад спектру випромінювання та ступеня монохроматичності (чистоти) кольору як якісного показника випромінювання світлодіода. На графіку рис. 3.4 наочно видно положення описаних величин, розрахованих заздалегідь з наведеного там спектра, розуміння сенсу яких дозволить нам далі докладно розглянути їх залежності від температури і уявити, як це виглядає в зоровому сприйнятті випромінювання світлодіодів оком людини.

Особливо варто відзначити відносну спектральну світлову ефективність випромінювання (оптичний коефіцієнт, вимірюваний в лм / Вт). Цей параметр теж інтегральний, і саме він здійснює зв'язок абсолютних енергетичних характеристик випромінювання з функцією  $V(\lambda)$ , коли мова йде про світловому потоці і потужності світлового випромінювання. Коефіцієнт показує, яка інтегральна, «вагова» частка досліджуваного спектра присутній в випромінюванні щодо всієї «маси» - кривий відносно  $V(\lambda)$ .

Однак все ж варто відзначити, що цей параметр включає в себе інтегральну суму всіх окремих описаних величин і тому служить хорошою характеристикою якісних показників спектра.

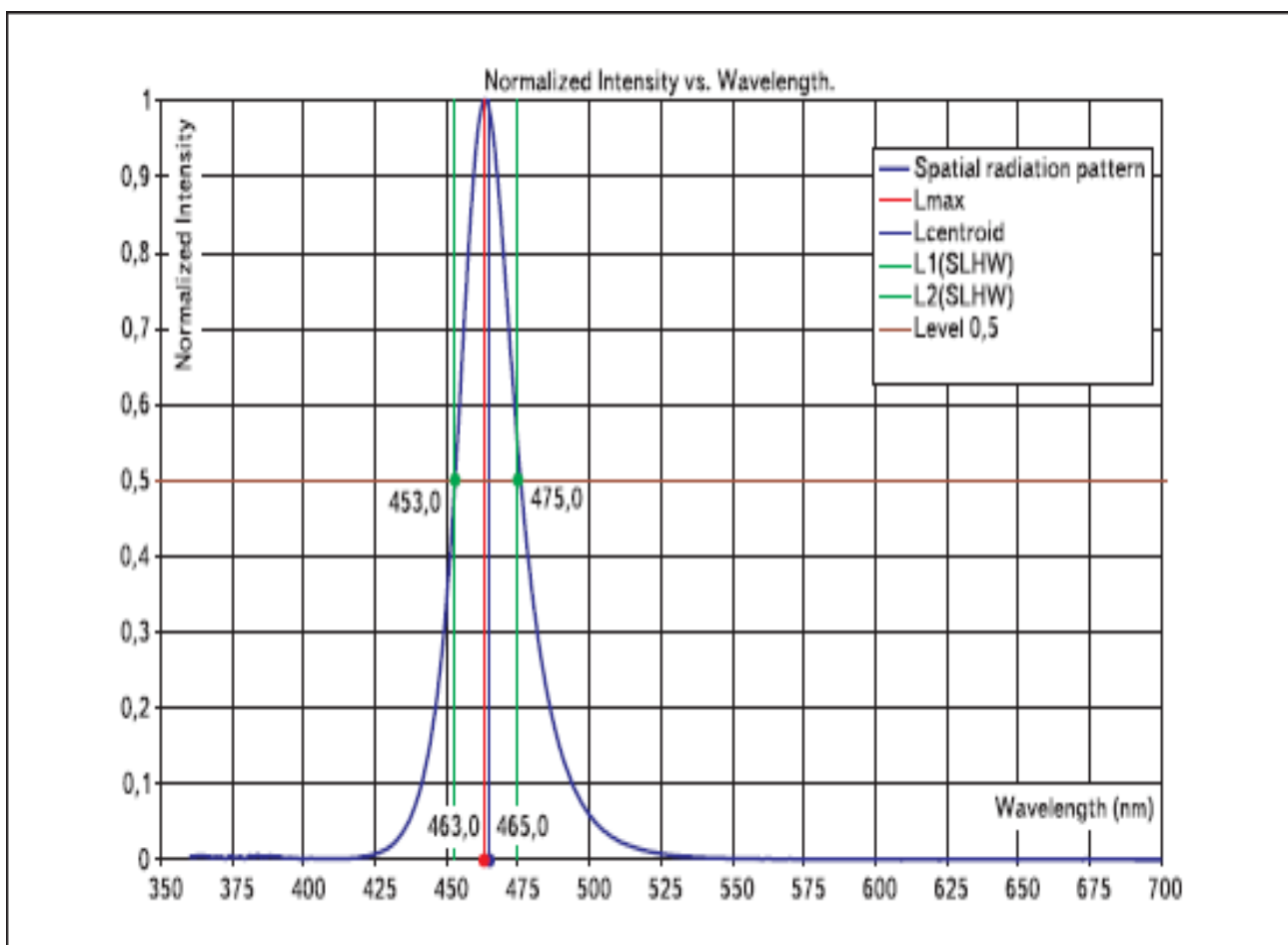
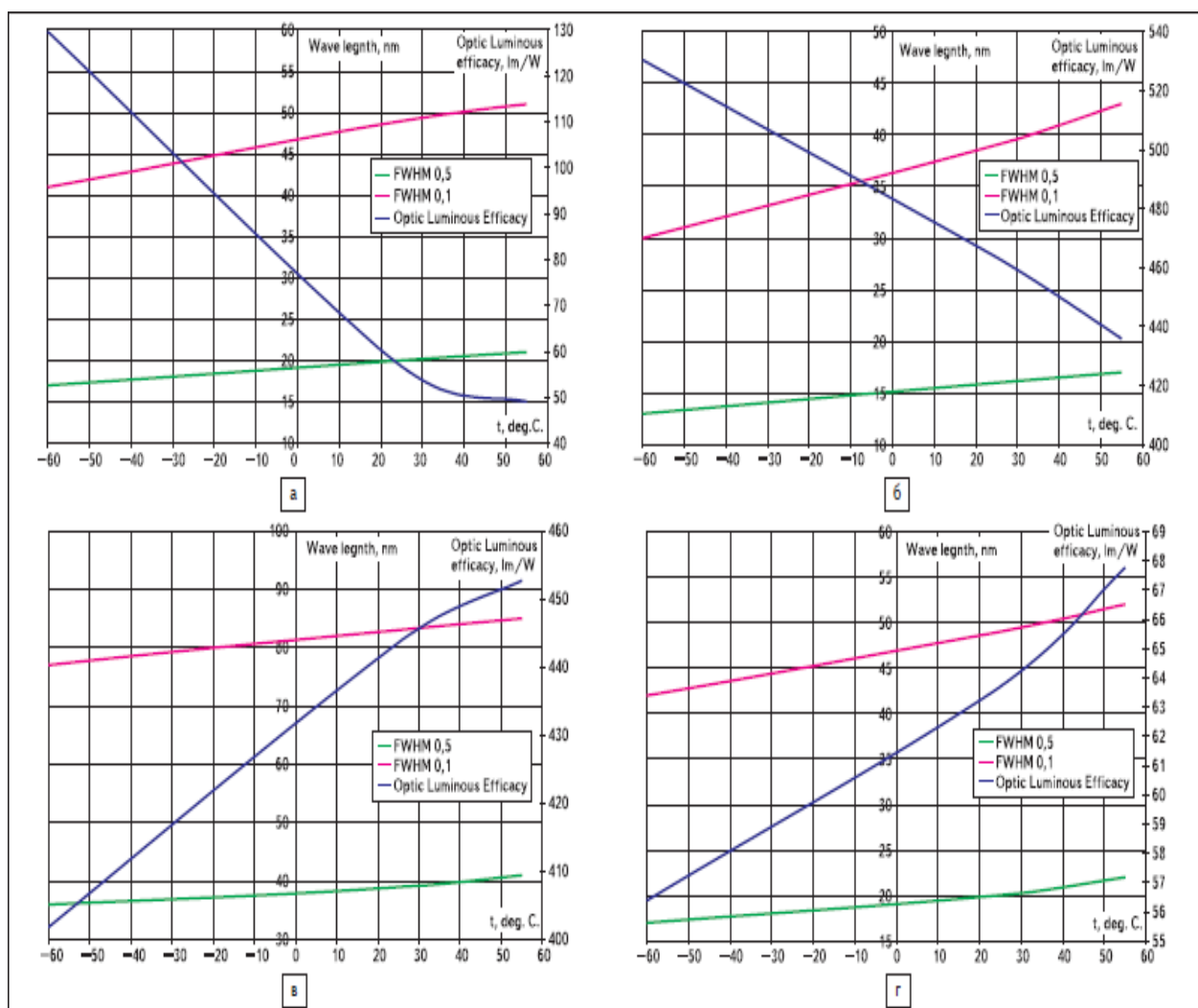


Рисунок 3.4 – Детальна структура спектру синього світлодіоду

А значить, його поведінку при зміні температури, показане на рис. 3.5 синьою лінією на всіх графіках, разом зі зміною півширини спектра дозволить чітко уявляти картину доглядів колірних і потужних (мається на увазі квантовий вихід або оптична потужність) характеристик світлодіодів, особливо якщо зв'язати ці залежності з люмен-амперними.



а) червоний

в) зелений

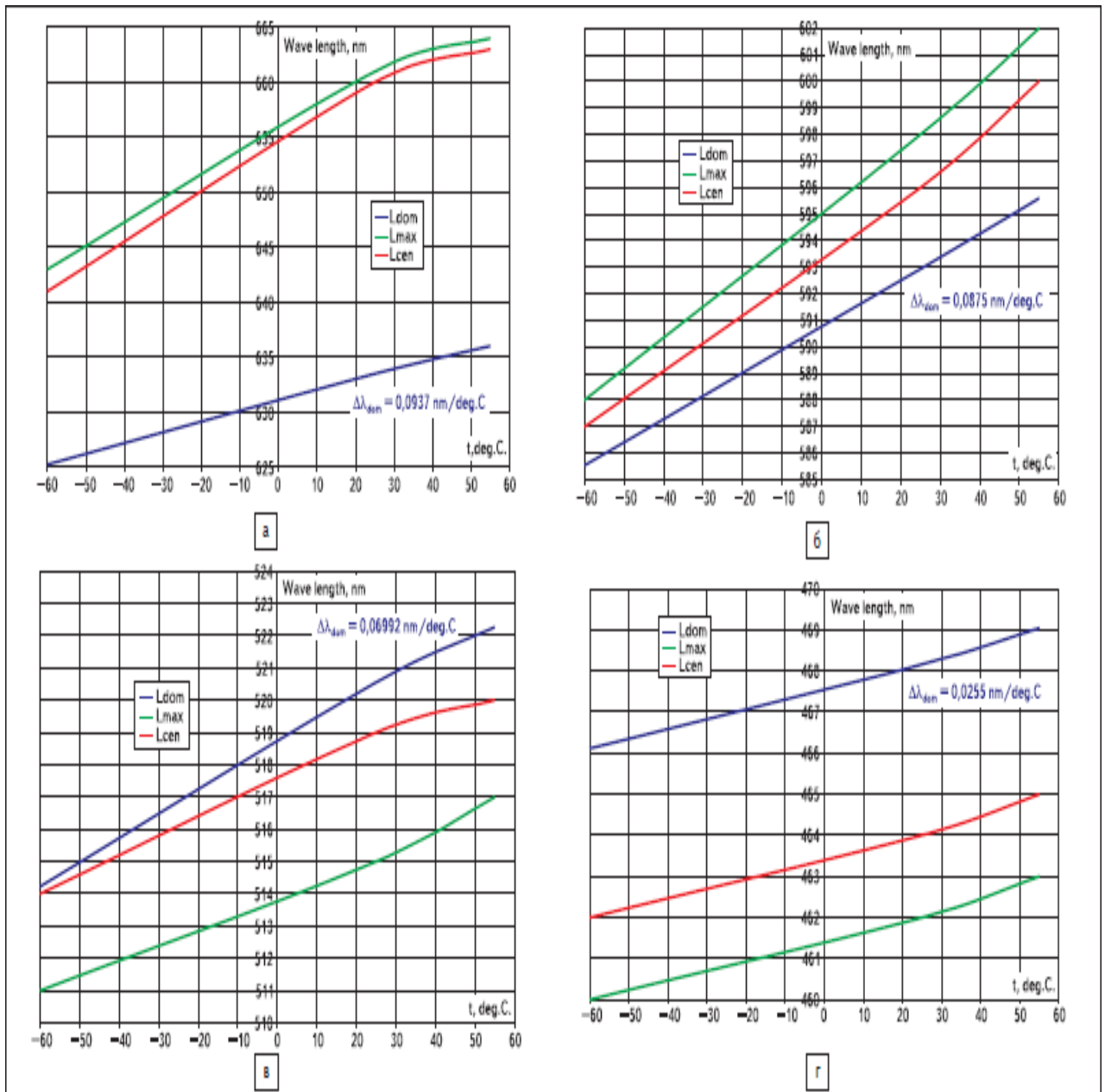
б) жовтий

г) синій

Рисунок 3.5 – Спектральна ефективність випромінювання і ширина спектра випромінювання за рівнями 0,1 і 0,5 світлодіодів при різних температурах навколишнього середовища від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$

На рис. 3.6-3.7 розглянуті залежності колориметричних параметрів від температури, які найбільш часто вказуються в специфікаціях. Це мають малий фізичний зміст домінуюча довжина хвилі  $L_{dom}$  і координати кольоровості.

Очевидно, що такий підхід до колориметричних параметрів світлодіодів для більшості пристроїв на їх основі абсолютно не потрібен, але ми розглядаємо практично всі можливі, і в тому числі зазначені певними стандартами, застосування світлодіодів на практиці.



а) червоний

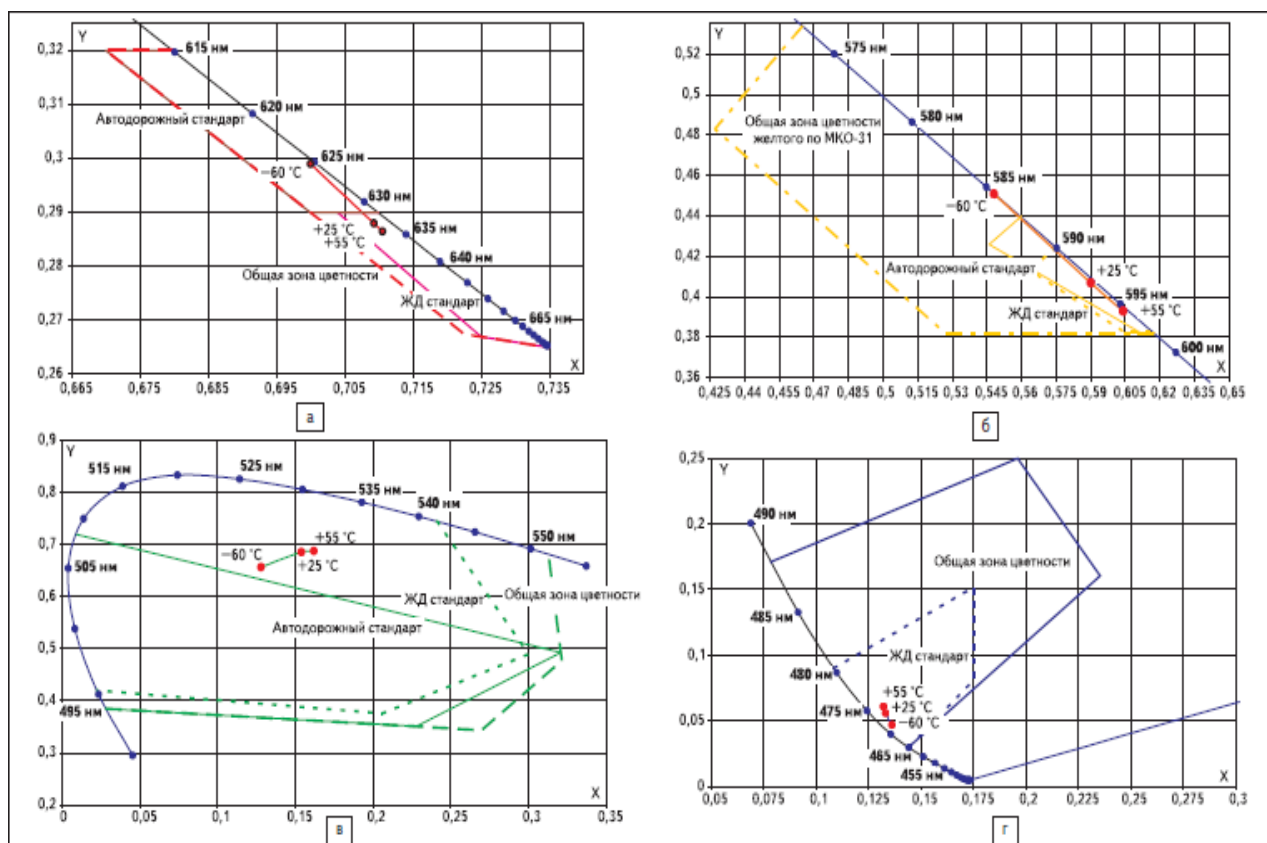
б) жовтий

в) зелений

г) синій

Рисунок 3.6 – Домінуюча  $L_{dom}$ , максимальна  $L_{max}$  і центральна  $L_{cen}$  довжини хвиль випромінювання світлодіодів при різних температурах навколишнього середовища від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$

Цифрами на вставках вказано усереднений градієнт зміни  $L_{dom}$  в зазначеному діапазоні температур.



а) червоний

в) зелений

б) жовтий

г) синій

Рисунок 3.7 – Координати кольоровості випромінювання світлодіодів на графіку МКО (1931) при температурах навколишнього середовища від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$

У 1931 році Міжнародна комісія з освітлення (СІЕ) надала інформацію з вимірювання реакції на колір кількох тисяч людей та ввела поняття «стандартного спостерігача». Воно являє собою відповідне графічне зображення за допомоги координатної сітки, всього різноманіття існуючих кольорів, які розподілені кількісно по системі X, Y, Z.

Графік дозволяє легко переходити від триколірних коефіцієнтів x, y, z до координат - колірний тон, чистота кольору.

Реакція стандартного спостерігача на кольори різних частин спектру описується через так званий tristimulus - три криві, позначені X, Y і Z (див. рис. 3.8).

Система кольорів tristimulus базується на факті, що кожен колір - це є сума трьох первинних кольорів: зеленого, червоного та синього. Діаграма кольорів CIE (див. рис. 3.9) отримана з урахуванням значень tristimulus таким чином:  $X = X / (X+Y+Z)$  чи  $X = \text{Червоний} / (\text{Червоний} + \text{Зелений} + \text{Синій})$

$Y = Y / (X+Y+Z)$  чи  $Y = \text{Зелений} / (\text{Червоний} + \text{Зелений} + \text{Синій})$

Так як,  $(X + Y + Z) = 1$ , третя вісь  $Z = 1 - (X + Y)$ .

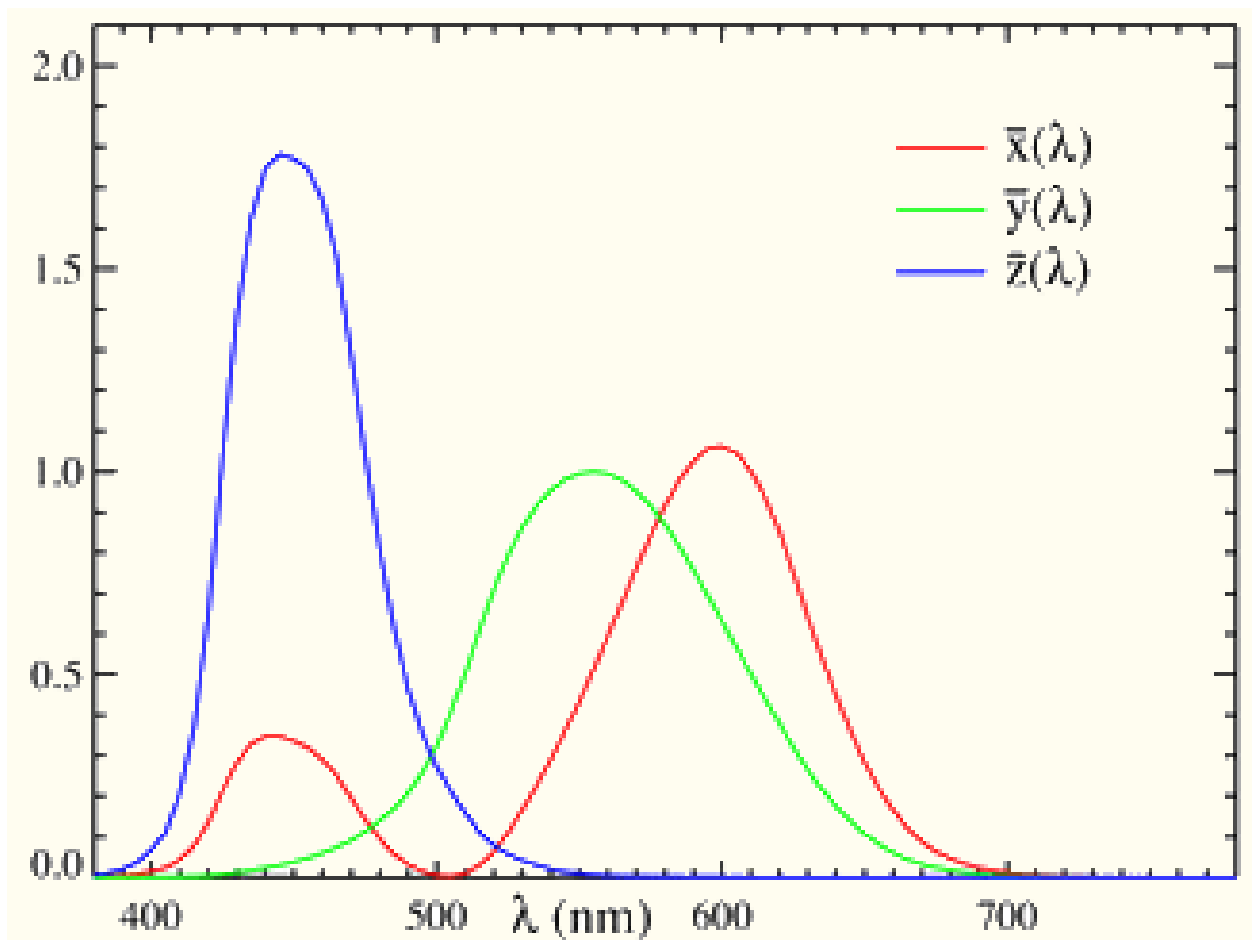


Рисунок 3.8 – Розподіл кривих складання

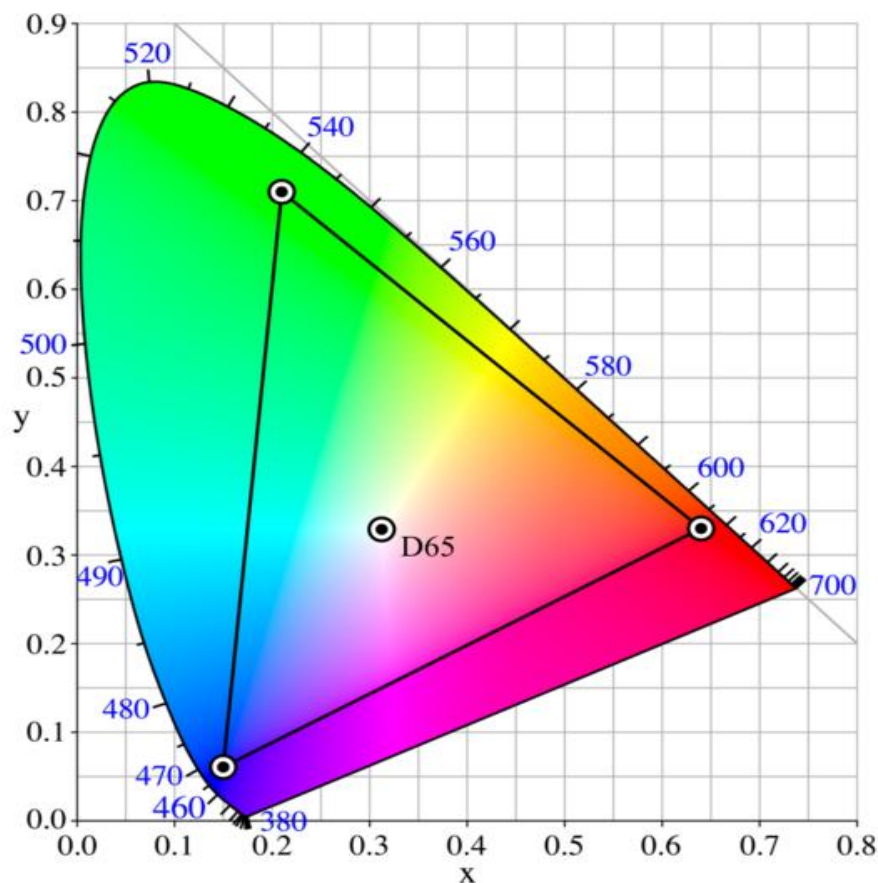


Рисунок 3.9 – Колірний графік СІЕ (1931 р.)

Зазвичай кольорові координати визначають тільки осями  $X$  і  $Y$ . Та якщо світлодіодне світіння не є білим, лівові частини специфікацій, що надаються різними виробниками, не містять координати кольоровості, а швидше пікову та домінуючу довжини хвиль. Перше – домінуюча довжина хвилі використовується для знаходження кольору в координатах СІЕ і вимірюється в нанометрах (нм). Це є, по суті, той колір, що фактично сприймається людським оком. Параметр – пікова довжина хвилі — це є довжина хвилі максимуму розподілу спектральної інтенсивності. Пікове значення досить легко визначити, тому воно часто є найбільш вживаним параметром, що вказують виробники світлодіодів. Але пікова довжина хвилі зазвичай має невелике практичне значення щодо застосувань в області вимірів спектру, який сприймається

людським зором: два світлодіоди можуть мати практично однакову пікову довжину хвилі, однак будуть оцінюватись людиною як різні кольори.

В останній час найбільш точний метод оцінки кольору — це використання спектрорадіометра. Цей пристрій реєструє та виміряє спектральний розподіл яскравості джерела світла через енергію, після цього можна математично обчислити всі фотометричні, радіометричні та подальші колориметричні параметри. Вимірювальна точність визначення цим пристроєм довжини хвилі може бути не гірше, ніж 0,5 нм (бажано 0,1 нм).

Як ми вже вище говорили, є різні фактори, які впливають на отриманий результат. Серед них важливим є температура. За підвищення навколишньої температури середовища росте і температура робочої області світлодіода, таким чином, це впливає на збільшення довжини хвилі випромінювання світлодіода. Це збільшення як правило має значення в межі 0,1-0,2 нм/°C залежно від матеріалу використовуваного діода. Деякі джерела, наприклад, червоного світіння, спроможні демонструвати також негативну температурну залежність від довжини хвилі.

### 3.3 Ультрафіолетові та сині світлодіоди

Світлодіоди с широкою забороненою зоною зазвичай створюють на основі GaN (нітрид галію), і InGaN (нітрид галію, індію).

Перші сині світловипромінюючі діоди (СВД) були створені у 1971 р. Жаком Панковим в лабораторії RCA. Спочатку ці пристрої мали дуже невелику фотовіддачу, щоб знайти велике практичне застосування. Однак, в даний момент світлодіоди швидко знайшли застосування наприклад в якості яскравого джерела випромінювання в індикаторних панелях різних приладів наприклад, в автомобілях.

Наприкінці 1980-их, були досягнуті ключові великі досягнення в технології епітаксійного росту матеріалу нітриду галію GaN з легуванням р-типу, описані в «сучасна ера оптоелектронних пристроїв на базі GaN».

Використовуючи ці напрацювання, у 1993 були продемонстровані сині світлодіоди (СВД) високої яскравості.

Зелені СВД, виготовлені на базі системи InGaN-GaN, набагато більш ефективні і більш яскраві, ніж зелені СВД, вироблені з інших напівпровідникових систем.

З напівпровідниковими системами, що містять алюміній, найчастіше це AlGaIn і AlGaInN, можливо досягти випромінювання ще більш коротких довжин хвиль. Вже зараз на ринку стають доступними ультрафіолетові СВД, що випромінюють світло в діапазоні коротких довжин хвиль. Майже всі ультрафіолетові СВД працюють в діапазоні довжин хвиль 375...395 нм вже дешеві у виробництві і часто застосовуються, наприклад, для заміни лампи невидимого (УФ) випромінювання, для перевірки дійсності грошових знаків і документів в УФ променях. Світловипромінюючі діоди з випромінюванням в області коротких довжин хвиль, поки дороги. Однак і їх виробництво можливо аж до 247 нм довжини хвилі. Оскільки фоточутливість мікроорганізмів приблизно відповідає спектру поглинання ДНК, з піком приблизно в 260 нм, ультрафіолетове (невидиме) випромінювання в області 250...270 нм може використовуватися в приладах для дезінфекції і пристроях для стерилізації приміщень і інструментів. Недавнє дослідження показало, що комерційно доступні ультрафіолетові СВД (365 нм) - уже застосовуються як більш ефективний засіб при дезінфекції і для пристроїв стерилізації.

### 3.4 RGB системи

Білий світ може бути проведений шляхом одночасного випромінювання декількох СВД: червоного, зеленого і синього. Цей метод деякі називають, різнокольоровий білий СВД (іноді називають RGB СВД). Його механізм пов'язаний з властивістю нашого зору сприймати одночасне випромінювання декількох різних кольорів як білий колір, але цей підхід рідко використовується для виробництва білих випромінювачів. Однак він може бути цікавий в інших

додатках через гнучкість при необхідності отримувати відчуття різних кольорів, крім того, цей метод має більш високу квантову ефективність при емісії білого світла. Форма і розміри світлодіодів бувають різними (рис. 3.10).

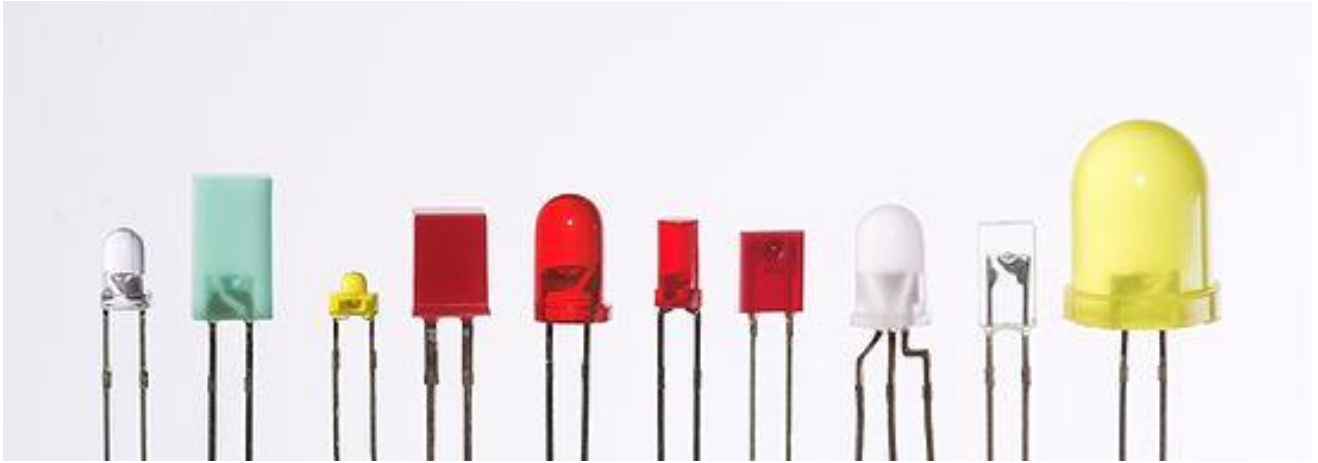


Рисунок 3.10 – Різноманіття розмірів, форм та кольорів світлодіодів

### 3.5 Органічні світловипромінюючі світлодіоди (OLED)

Якщо світловипромінювальний діод створений на базі органічних матеріалів, то такий випромінювач відомий як світловипромінювальний діод на базі органічних сполук (OLED). Щоб функціонувати як напівпровідник, органічний матеріал випромінювача повинен мати характеристики напівпровідника. Матеріалом такого випромінювача можуть бути органічні молекули або полімери. Матеріали з полімеру можуть бути гнучкими; такі OLEDs відомі як PLEDs або FLEDs.

У порівнянні зі стандартними неорганічними СВД, OLEDs легше, а матеріал для їх виготовлення може ще мати і специфічні властивості, для того щоб забезпечити наприклад гнучкість світловипромінюючих панелі. Передбачається, що в майбутньому OLEDs будуть: недорогими, гнучкими пристроями для використання в дисплеях, джерелах світла і як елементи художнього оформлення.

OLED використовуються у виробництві дисплеїв для портативних електронних пристроїв, типу стільникових телефонів, цифрових камер, і MP3-плеєрів. Демонструвалися також і великі дисплеї, але їх тривалість роботи все ще занадто мала (<1 000 годин) для того, щоб стати широко застосовними в практичних цілях.

### 3.6 Мініатюрні СВД

Мініатюрні світловипромінюючі діоди є головним чином дискретними СВД, які передусім використовуються як індикатори, вони мають різні розміри з діаметром корпусу від 2 мм до 8 мм, виготовляються у вигляді окремих корпусних приладів або в вигляді чіпів пристосованих для поверхневого монтажу. Вони зазвичай прості у використанні і не вимагають окремого охолодження. Фото світловипромінювальних діодів СВД, розміщених для наочності поруч із сірником, з різними зовнішніми діаметрами



Рисунок 3.11 – Фото світловипромінювальних діодів СВД, розміщених для наочності поруч із сірником, з зовнішніми діаметрами 8 мм, 5 мм і 3 мм

### 3.7 СВД середньої та великої потужності

СВД середньої потужності використовуються, коли необхідна світлова віддача на рівні кількох люменів. Їх іноді виготовляють у вигляді пристрою складається з чотирьох кристалів, яке використовує (два катода і два анода) з поліпшеним відведенням температури від кристалів, і має інтегровану полімерну лінзу. Наприклад світлодіодні випромінювачі компанії Philips Lumileds. Ці СВД зазвичай використовуються як аварійне освітлення наприклад при пожежі і в автомобільних задніх фарах. Вони в змозі працювати з більш високими струмами (приблизно до 100 міліампер). Більш високий струм на увазі і більш високу світлову віддачу, необхідну для задніх автомобільних фар і аварійного пожежного освітлення

Високопотужні випромінювачі СВД від Philips, Lumileds, Cree які застосовуються як елементи освітлення, встановлюють на друковану плату у формі зірки діаметром 21 мм. Потужні СВД (HPLED) можуть працювати при режимах з силою струму в ланцюзі від сотень міліампер до Ампера і більше, в порівнянні з десятками міліампер для звичайних СВД.

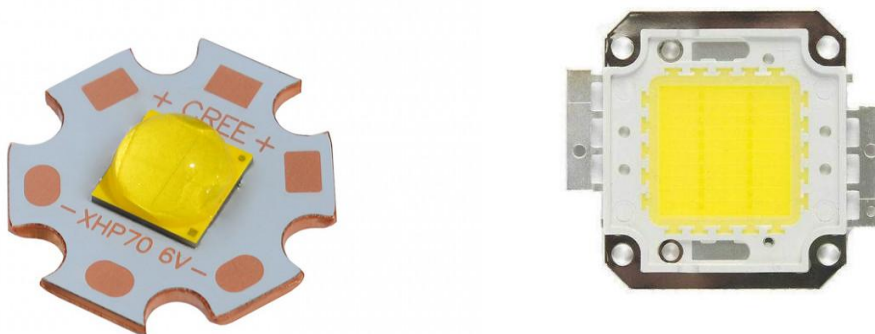


Рисунок 3.12 – Високопотужні випромінювачі СВД від Philips, Lumileds, Cree, які застосовуються як елементи освітлення

Деякі випромінювачі можуть досягати яскравості більш ніж тисячі люмен. Так як перегрів є руйнівним чинником для чіпа, HPLEDs повинен бути встановлений на тепловідводній основі, яка переносить теплове випромінювання від чіпа до зовнішнього радіатора. Якщо високе теплове випромінювання HPLED не буде відведено, то пристрій може бути спалено за секунди. Єдиний чіп HPLED часто може замінювати лампу розжарювання в прожекторі, або може бути зібраний у вигляді матриці чіпів, які формують потужне випромінююче джерело світла.

## 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ РОСЛИННИХ КУЛЬТУР

### 4.1 Необхідність систем освітлення в залежності від видів рослин

Те що рослинам необхідне освітлення для нормального зростання знають усі дорослі та діти. Усім нам відомо, що процес фотосинтезу є життєво необхідним для рослин, та відбувається на світлі. Навіть не дуже освідчений прихильник кімнатних квітів знає, що цим рослинам потрібне яскраве сонячне світло, а іншим необхідне розсіяне, ще деякі краще підростають у тіні. Квіти з субтропиків, що люблять світло, вирощують на вікнах, відкритих на південь, а тіньолюбних лісних мешканців ліпше розмістити відповідно на північних. Якщо ж говорити про глибину кімнати, то там можуть нормально розвиватися тільки рослини, що вельми тіньовитривалі, іншим необхідно забезпечити додаткове підсвічування (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Варіант підсвітки кімнатної рослини

Досвідчений фахівець ніколи не стане чекати до того, коли його рослини повитягались та починуть втрачати листя. У такому разі перш за все, необхідно точно знати, що це – тенелюб конкретний вид, або ні. та йому потрібне яскраве світло, про це можна дізнатися в відповідній енциклопедії кімнатних рослин. Якщо ж є підозра, що для домашньої квітки темно, у такому разі треба обов'язково встановити деякі лампи для підсвічування.

Багато починаючих аматорів квітів, що дізнались про можливість використання додаткового штучного освітлення, відразу починають світити на рослини цілодобово. Та, всупереч очікуванням, вони зовсім марніють. У разі темряви у рослин відбуваються теж необхідні для життя процеси. Важливе значення має процес регулярного чергування дня і ночі. Зміна цих періодів необхідна для цвітіння багатьох видів.

#### 4.2 Критерії вибору джерел випромінювання для освітлення рослин

Якщо вибираєш лампи для рослин, треба знати: Важливе значення має не стільки інтенсивність, та і розподіл спектру світлового випромінювання. Оптимальним є спектр денного світла практично для всіх рослин, що простягнеться від інфрачервоних променів, через видимі, до ультрафіолетових.

Стандартні штучні джерела світла дають освітлення, що в тій чи іншій мірі схоже на денне, та не у всьому спектрі. Відомо донеда, що пігмент хлорофіл, що безпосередньо перетворює енергію світла в енергію звязку органічних сполук, найліпше поглинає спектр червоної і синій частинах в світлі. Світло синьо-фіолетове сприяє наростанню зеленої маси на початку перших розвитку рослин, червоне світло прискорює ріст на стадіях проростання насіння і пагонів.

У якості джерел світла можна використовувати різні види ламп, наприклад: лампи розжарювання, газорозрядні люмінесцентні лампи (ЛЛ), звичайні газорозрядні лампи (ГР) та світлодіоди. Професіонали в даний час,

зазвичай, використовують газорозрядні і люмінесцентні лампи щодо освітлення рослин.

Звичні лампи розжарювання з ниткою з вольфраму погано підходять для цього – бо інтенсивність їх світла дещо занижка, вони дуже нагріваються, та в їх спектрі дещо багато помаранчевих, червоних та інфрачервоних променів, які прискорюють ріст вертикальний, під такими лампами розжарювання рослини витягуються.

Люмінесцентні лампи є найближче до спектру денного освітлення, до того ж вони економічніше, ніж лампи розжарювання. Багато є рослин, що найкраще розвиваються тільки під такими лампами. Можна назвати сенполії, бальзаміни, які з підсвічуванням люмінесцентними лампами можуть цвісти всю зиму безперервно.

У цей час на ринку є досить ефективні та економічні лампи, що виконані на основі світлодіодів. Виконуючи поєднання світлодіодів різних кольорів можна отримати світильники, що випромінюють в потрібних ділянках спектра та корисні за різних стадій вегетації.

У продажі також спеціальні фітолампи. Це лише на перший погляд вони не відрізняються від звичних ламп, та вони формують світловий потік здебільшого в синьому та червоному спектрі, що призначений для процесів, щоб активізувати фотохімічні реакції та гарно вплинути на швидкість розвитку. За умови змішування червоного і синього світла маємо світло пурпурного (рожевого) відтінка. Та таке світло є часто для людини неприємне.

#### 4.3 Конструкції та варіанти розміщення ламп штучного освітлення

При умові розміщення світильників важливо знати те, що якщо відстань до лампи зменшити в два рази, то інтенсивність світла на рослині зросте в чотири рази.

Якщо на листках рослини з'явилися сліди опіків, то маємо лампи, що повішені дуже низько, тоді як витягнуті стебла та бліде листя говорять про те, що пристрій світла занадто далеко.

За бічного штучного освітлення рослини можуть викривляти стовбури в напрямку падіння світла, тому краще досвічувати зверху.

При освітленні великих теплиць використовується значна кількість спеціальних типів освітлення (рис. 4.2, 4.3))



Рисунок 4.2 – Варіант вертикального освітлення теплиці



Рисунок 4.3 – Потолочне підвісне освітлення теплиці

Задля інтенсивного та повноцінного розвитку рослин, вони повинні мати підсвічування до 16 годин на добу, якщо ж тривалість опромінювання менше 10 годин, приріст культур зупиняється. Окрім цього, опромінювання довжиною хвилі (600-700) нм, яке лежать в червоній області спектру є найбільш сприятливим за умови цвітіння рослин та утворення плоду, також на зростання впливає досить істотно синє світло, що його довжина хвилі 400-500 нм.

Звідсіль випливає висновок, що використовувати замість сонячного світла можливо тільки «потрібні» синій та червоний. Таким чином необхідне спеціальне опромінювання. Ті користувачи, що не є прихильниками описаного вище висновку, зі своєї сторони стверджують – використання монохроматичного світла у значній кількості негативно впливає на результаті. Широке використання «потрібного» світла — це дуже стресова ситуація щодо вирощуваної культури. Також урожай, часом, не дуже радує ані своїми смаковими, ані якісними характеристиками, а склад та вміст корисних мінеральних речовин та вітамінів зменшується у таких плодах.

І реалізація це підтверджує. За звичайною їжею можна завжди зайти в найближчий супермаркет, а гнути спину в теплиці дома для того, аби зелень на

столі була корисною та найсмачнішою в світі. Виходячи з сказаного, потрібно розважливо використовувати спеціальне освітлення та грамотно поєднувати його з загальним природним.

На цей день, ще жодна з наукових лабораторій не зробила прилад, що з необхідною точністю імітує сонячне світло. Та окремі наукові досягнення можна продумано використовувати, таким чином створюючи потрібний клімат для культур, особливо в самих холодних регіонах. Треба пам'ятати, що від малого освітлення рослини можуть висохнути, більше подовжитися, дати ламкі та неправильно дозрілі плоди. На останок треба тільки повторити, що варто не відмовлятися від досягнень науки, а з розумом їх використовувати.

«Давні як світ» лампи розжарювання чудово освітлюють простір будови, крім цього, але вони ще і нагрівають повітряне середовище і рослини, що дуже часто буває корисно. Але довжини хвиль, близькі до 600 нм, не найпривабливіша частина спектру, так і з економічної точки зору, говорити про ефективність не доводиться. Крім того, певна частина випромінювання містить помаранчеві та інфрачервоні промені, від тривалого впливу яких відбувається витягування стебел і деформація листків.

Зокрема, з цієї причини, випромінювачі такого типу не використовують при культивуванні томатів і огірків. Зате з успіхом застосовують для вигонки зелені, наприклад, цибулі, пастернака, базиліка і петрушки, а також інших видів зелені.

Ртутні лампи високого тиску розігріваються з дуже великою швидкістю і це їх недолік. Але не основний. Гірше інше, підвищений генерування радіації в УФ частині спектру. Але якщо не перестаратися, і подбати про найбільшому проникненні в тепличне споруда природного освітлення, то можна добитися хорошого врожаю з доброю якістю.

Існує варіант економних випромінювачів в особі люмінесцентних ламп. Генеровані ними хвилі лежать у більш сприятливому інтервалі для тепличних культур. В арсеналі їх достоїнств низька вартість і великий термін експлуатації. Такий же принцип випромінювання закладений і в енергозберігаючі лампи, які

теж використовуються для цих же цілей в теплицях. Але на відміну від своїх візаві покривати випромінюванням вони можуть значно меншу площу. Розташовуватися люмінесцентні лампи на об'єкті можуть як в горизонтальному, так і у вертикальному положенні. У першому випадку їх монтують в раму прямокутної форми, зроблену з металу, у другому установка проводиться в стандартній для освітлення арматурі.

Серед варіантів освітлювачів можна зустріти і дуже економічні натрієві лампи високого тиску. Рівень світловіддачі досить високий, колір випромінювання — жовтий з оранжевим відтінком, близько підходить за своїми якостями до природного сонячного світла. Величина випромінювання в синій частині спектру мала, і вплив на вегетацію незначне.

А ось найбільш широким діапазоном частот випромінюваних коливань мають металогалогенні світильники. Потужності таких ламп також варіюються в широкому інтервалі значень. З точки зору спектру вони - самі відповідні для досвічування випромінювачі. На жаль, вони дорого коштують і мають невеликий термін служби. До мінусів відносять і незручність, пов'язане з тим, що розташування цих ламп не завжди може бути довільним.

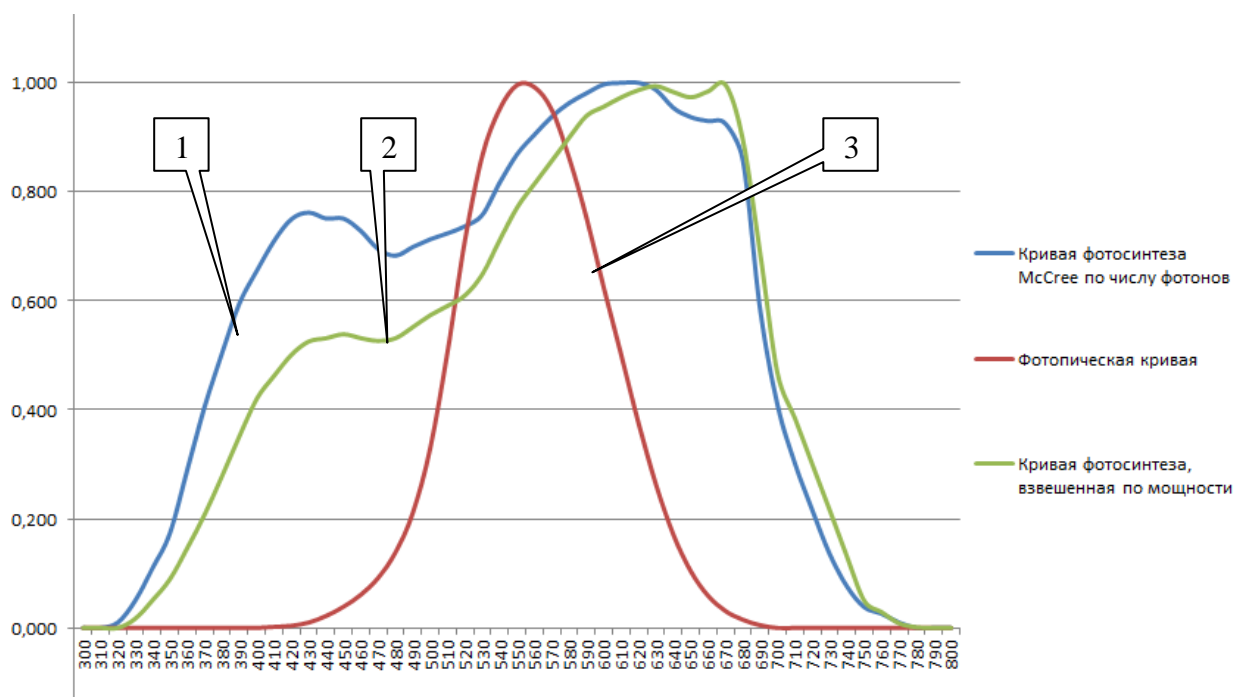
У суперяскравих світлодіодів великі перспективи, особливо у білих порівняно недавно з'явилися. У цій області інтенсивні дослідження проводяться в багатьох країнах. Використовуючи світлодіоди можна красиво оформлену організувати систему підсвічування рослин «потрібним світлом». І хоча світлодіоди коштують дорогоувато, зате мають мізерне споживання електроенергії і недоступне для інших випромінювачів час експлуатації. Наскільки відомо, реалізація перших дослідів застосування світлодіодів для досвічування належить данським фахівців, які змогли заощадити в промислових теплицях до 40% електроенергії. При цьому освітлювальні лінії склалися з 50 тисяч світлодіодів. Рослини, а це були квіти, почувалися чудово. Спостерігався більш інтенсивний ріст квітів зі збільшенням кількості бутонів. Додаткова економія звелася до того, що кількість хімікатів для стимулювання росту квітів було різко скорочено.

#### 4.4 Порівняльні характеристики сучасних освітлювачів для рослин

«Старі як світ» лампи розжарювання чудово висвітлюють простір будови, крім цього, вони але ще і нагрівають повітряне середовище і рослини, що дуже часто буває корисно. Але довжини хвиль, близькі до 600 нм, не найпривабливіша частина спектра, та й з економічної точки зору, говорити про ефективність не доводиться. Крім того, певна частина випромінювання містить помаранчеві і інфрачервоні промені, від тривалого впливу яких відбувається витягування стебел і деформація листя.

Зокрема, з цієї причини, випромінювачі такого типу не використовують при культивуванні томатів і огірків. Зате з успіхом застосовують для вигонки зелені, наприклад, цибулі, пастернаку, базиліка, і петрушки, а також інших видів зелені.

При аналізі ефективності освітлювачів важливий критерій ефективності поглинання випромінювання споживачем, в даному випадку - рослиною. Виявляється рослини по різному використовують світло різних спектральних діапазонів. Причому крива фотосинтетичної активності світла відрізняється від кривої чутливості людського ока. На рис. 4.4 представлені залежності фотосинтетичної активності рослин від світлового потоку певної довжини хвилі ( $F_f$ ), залежно фотосинтетичної активності рослин від потужності падаючого світла певної довжини хвилі ( $F_P$ ), чутливості людського ока ( $K$ ).



1 – крива фотосинтезу McCree за кількістю фотонів ( $F_{\Phi}$ ), 2 – крива фотосинтезу, зважена за потужністю ( $F_P$ ), 3 – крива чутливості людського ока ( $K$ ) (фотопична крива)

Рисунок 4.4 – Залежності чутливості сприйняття світла людиною та рослинами (відн. од.)

Криві сильно відрізняються один від одного. Це означає, що рослини по-іншому сприймають світло, ніж людина.

Люмени вимірюються датчиком, мають чутливість, строго відповідну наведеної фотопической кривої. А фотосинтез здійснюється відповідно до наведеної кривої McCree (графічне відображення інтенсивності фотосинтезу в залежності від довжини хвилі). Кривих на малюнку дві. Одна з них — нормована до числа фотонів, а друга до потужності випромінювача.

Якщо використовувати криву, нормовану по числу фотонів, то ми допускаємо похибка, оскільки не враховуємо ефективність конверсії енергії фотонів в акти хімічної реакції фотосинтезу. Ця ефективність сильно залежить від довжини хвилі (частоти), а саме, лінійно зменшується із зменшенням

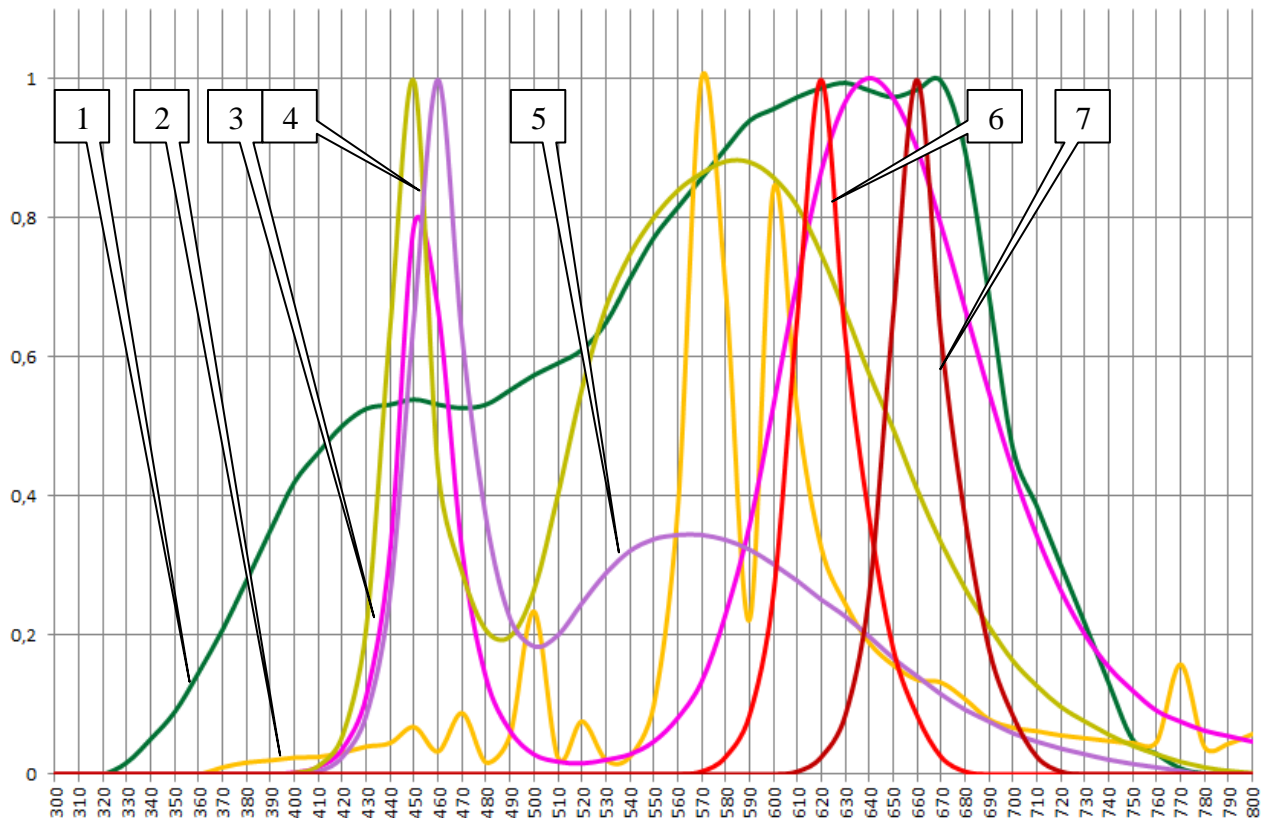
довжини хвилі (збільшенням частоти  $\nu$ , відповідно, енергії кванта випромінювання).

Індекс передачі кольору — це якийсь віртуальний показник, який говорить — на скільки точно будуть передані кольору (фотографії, тканини тощо) при освітленні їх даними джерелом світла.

Для об'єктивної оцінки ефективності поглинання світла різних освітлювачів наведемо на одному графіку спектри джерел випромінювання і спектри поглинання для фотосинтезу, причому, з урахуванням вищенаведених міркувань, використаємо криву, нормовану до потужності випромінювача (рис. 4.5).

4.5 Методика розрахунку відносної ефективності випромінювачів та результати оцінки ефективності та ККД

Спочатку розрахуємо коефіцієнт фотосинтетичної активності КФ для кожного джерела. Для цього для вибраного джерела множимо потужність випромінювання на кожній довжині хвилі  $P_\lambda$  ( $\lambda$ ) на число з графіка McCree  $FP(\lambda)$ , для тієї ж довжини хвилі.



1 – крива фотосинтезу, зважена за потужністю, 2 – спектр випромінювання ДНАТ, 3 – спектр фітолампи, 4 – спектр білого LED з температурою 4000К, 5 – спектр білого LED з температурою 6000К, 6 – спектр червоного LED з максимумом 625 нм, 7 – спектр червоного LED з максимумом 660 нм

Рисунок 4.5 – Порівняння спекту фотосинтетичного поглинання (зваженого за потужністю) та спектрів випромінювання світлодіодних та натрієвих випромінювачів

Потім підраховуємо інтеграл (суму) потужності для початкового графіка  $P_{\lambda}(\lambda)$  і інтеграл (суму) результату перемноження  $P_{\lambda}(\lambda) \times FP(\lambda)$ . Ділимо друге першу - отримуємо коефіцієнт, що означає ефективну частку випромінювання для даного джерела (ту, яка візьме участь у фотосинтезі):

$$K_{\Phi} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda}(\lambda) \cdot F_{\Phi}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (4.1)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  – довжини хвиль нижньої та верхньої границі діапазону випромінювання джерела;

$P_{\lambda}(\lambda)$  – залежність потужності випромінювання джерела від довжини хвилі;

$F_{\Phi}(\lambda)$  – залежність ефективності фотосинтезу, зваженої за потужністю від довжини хвилі.

Результати розрахунків  $K_{\Phi}$  наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Відносна ефективність джерел випромінювання з урахуванням спектрів випромінювання та кривої фотосинтезу

№	Тип випромінювача	Відносна ефективність
1	Білий LED з температурою 6000К	0,7
2	Білий LED з температурою 4000К	0,77
3	Червоний LED з максимумом 625 нм	0,98
4	Червоний LED з максимумом 660 нм	0,98
5	ДНАТ	0,94
6	Фітолампа	0,79
7	Білий LED з температурою 4000К + Червоний LED з максимумом 625 нм	0,77
8	Білий LED з температурою 4000К + Червоний LED з максимумом 660 нм	0,78

За результатами розрахунків можемо зробити попередні висновки:

– ДНАТ - це супер для освітлення рослин! Ефективність його спектра досягає 79% і це для лампи, яку спочатку проектували в общем-то не для цього, а для освітлення автомагістралей і промислових об'єктів;

– фітолампи не дивлячись на "спеціальний" спектр вищими за звичайні білі світлодіоди з колірною температурою 4000К і не набагато краще "холодно-білих" 6000К;

– світлодіоди червоного (звичайного) і далекого червоного взагалі поза конкуренцією;

– виходить, що якщо хочеться вичавити все з кожного вата освітлення, потрібно брати звичайні червоні світлодіоди (випромінювачі далекого червоного - майже в 2 рази дорожче), а якщо хочеться заощадити в ціні апаратури - потрібно брати білі світлодіоди.

Висновки ці попередні і засновані тільки на оцінці ефективності спекр джерел, без урахування їх ККД і деяких інших моментів. Тому з'ясуємо далі.

Що ж буде, якщо врахувати ККД джерел? Дані про ККД взяті частково зі статті [10], а частково з інтернету [13].

Для більшої достовірності необхідно врахувати коефіцієнти відбиття від поверхні листів рослин, а також коефіцієнти поглинання (частина випромінювання проходить через лист), які також залежать від довжини хвилі [11], але це суттєво ускладнить розрахунки і виходить за рамки даної атестаційної роботи. Обмежимося урахуванням ККД.

Результати розрахунків наведені в табл. 4.2

Ось тут-то розстановка сил вже змінюється! Виявляється, світлодіоди з ССТ 4000К краще навіть ДНаТ! Причому, якщо на 1000 ватних ламп перевага це не істотне, то для натрієвих ламп малої потужності (100Вт) перевага вже досягає 2,4 крат! А фітолампи - марна трата грошей - вона поступається звичайним білим светодиодам на 25%! Ось тобі і фітолампи!

Таблиця 4.2 – Відносна ефективність джерел випромінювання з урахуванням ККД

№	Тип випромінювача	ККД випромінювача	Відносна ефективність
1	Білий LED з температурою 6000K	0,378	0,26
2	Білий LED з температурою 4000K	0,378	0,29
3	Червоний LED з максимумом 625 нм	0,35	0,34
4	Червоний LED з максимумом 660 нм	0,33	0,31
5	ДНАТ 1000 Вт	0,34	0,27
	ДНАТ 250 Вт		0,20
	ДНАТ 100 Вт		0,12
6	Фітолампа	0,269	0,21
7	Білий LED з температурою 4000K + Червоний LED з максимумом 625 нм	0,37	0,29
8	Білий LED з температурою 4000K + Червоний LED з максимумом 660 нм	0,35	0,27

Ось тепер можна зробити остаточні висновки:

– ДНАТ має порівнянну ефективність тільки при використанні ламп великої потужності (600-1000Вт). Якщо Ви власник великого тепличного господарства, то за сукупністю експлуатаційних характеристик лампи на кіловат — Ваш вибір! Витрати на встановлення освітлення та заміну ламп будуть істотно нижче, а витрати на електроенергію приблизно однакові зі світлодіодами. Мала кількість синіх променів у спектрі ламп компенсується навпаки високим їх кількістю в природному світлі, особливо взимку (колірна температура неба сягає 15000K!) — це якраз ситуація з теплицями, коли освітлення включається вранці та ввечері, а вдень використовується природне освітлення;

– найбільш ефективні світлодіоди з колірною температурою 4000К. 100 Ватна світлодіодна лампа дає на 43% більше фітоактивного випромінювання ніж лампа ДНаТ тієї ж потужності! Ціна, як не дивно, теж на стороні світлодіодів — ціна лампи ДНаТ на цей момент – трохи більше 1000 грн., у той час як світлодіоди з тією ж потужністю на «Аліекспрес» йдуть за 360 грн. (у виконанні COB — багато чіпів на одній підкладці)! Це ще не рахуючи баласту в обох випадках. Якщо ви ростите зелень на підвіконні або в гроубоксі, то білі світлодіоди — поза всякою конкуренцією. Достатньо один раз придбати хороші світлодіоди і ви забезпечені відмінним економічним освітленням на роки;

– Фитолампы. Грунтуючись на даних про практичне використання білих світлодіодів з статті [10], підтверджених тепер власним дослідженням доводиться констатувати, що вони не дають ніякого переваги з енергоефективності або по якості вирощених рослин, а все з точністю до навпаки!

Невелике пояснення по комбінаціям білих світлодіодів з червоними, що фігурували в таблицях. Ми для інтересу розглянули варіант освітлення, коли на додаток до білих світлодіодів додатково встановлюються звичайні червоні або спеціальні з далеким червоним спектром світіння (у пропорції 3:1 по потужності). Це буває необхідно для стимуляції цвітіння. Якщо ви розводите квіточки або суніцю або інші рослини, у яких цвітіння або плодоутворення є основною метою, це може бути виправдано. Якщо ви ростите салат і петрушку, то навряд чи варто морочитися — червоні світлодіоди дорожче білих рази в 2,5, а спеціальні „фіто“ з далеким червоним — в 4 рази! Якщо мета — наростити зеленої маси за мінімальні гроші, краще взяти ще один або навіть два білих світлодіода — буде краще і дешевше! Тільки не варто заганяти бідні діоди в труну — знаючи любов китайських товаришів до завищення параметрів, потрібно стежити, щоб при роботі підстава світлодіодів грілося як можна менше — подбати про ефективний тепловідвід і обмежувати робочий струм. Краще купити на 20% більше діодів і пустити на них на 20% менший струм і

таким чином в рази збільшити їх час життя, ніж навалити на повну котушку і через рік отримати 50% первинного світлового потоку і половину неробочих корпусів!

#### 4.6 Розрахунок складу, компоновки та параметрів світлодіодного освітлювача

Як з'ясовано, необхідна освітленість для гарного повноцінного росту кімнатних квітів становить 10000-15000Лк. Виходячи з цього варто відштовхуватися у розрахунку для рослин системи підсвічення з світлодіодів.

Маємо підсвічування розсади у коробці з розміром 0,75 м x 0,3 м. Забезпечимо освітленням рослини у 15 000 Лк.

Врахуємо, що 15 000 Лк це інтенсивність випромінювання 15 000 Люмен, що освітлює поверхню 1 м<sup>2</sup> на висоті 1 метр.

У нашому випадку освітлювана площа:

$$0,75 \cdot 0,3 \text{ м} = 0,225 \text{ м}^2$$

Таким чином інтенсивність світла, необхідна нам:

$$15000 \text{ Лм} / \text{м}^2 \cdot 0,225 \text{ м}^2 = 3375 \text{ Лм}$$

Як визначити висоту розташування освітлення? Це легко: отримана інтенсивність освітлення для рослин в 3375 Лм розрахована за розташування світлодіодних джерел на висоті 1м. Збільшуючи висоту в два рази, маємо зменшення необхідної інтенсивності у 4 рази (так званий закон зворотних квадратів. Підвісивши освітлення на висоті 0,5 м, будемо мати інтенсивність світла:  $3375/4 = 845 \text{ Лм}$

Також на останок треба підібрати LED стрічку з цими характеристиками. Вибираємо світлодіодну стрічку, що треба для підсвічування квітів.

У результаті розрахунку отримали інтенсивність світла у 845 Лм, що необхідна. Розміщуємо освітлення на висоті 0,5 м, інтенсивність світла отримаємо:  $3375/4 = 845 \text{ Лм}$

Для LED стрічки світловий потік вказується з розрахунку на метр. У разі, що нам потрібно тільки 0,75, тоді необхідно додати 25% до встановленго виробником світлового потоку дець  $845 / 2 \cdot 1,25$  (що компенсує довжину стрічки) = 530 Лм (у разі двох відрізків), та

$$845 / 4 \cdot 1,25 = 265 \text{ Лм (у разі чотирьох відрізків).}$$

Таким чином маємо підсумкові параметри стрічки:

Світловий потік 465 Лм;

Відтінок (температура) світла - поєднуємо теплий + холодний (3000К + 6000К);

Напруга живлення стандартна 12В – це найпоширеніший тип стрічок.

У нашому випадку нам підійде SMD3528-W-60led – треба узяти 3 метри, або SMD2835-W-60led – тоді 1,5м.

#### 4.7 Вибір блоку живлення для світлодіодного освітлювача

4.7.1 Треба підібрати підходящий драйвер блоку живлення освітлення кімнатних рослин. Є кілька критеріїв цього:

- споживана потужність (найважливіший);
- варіант корпусу;
- додаткові функції.

4.7.2 Розрахуємо потрібну потужність блоку живлення. На прикладі триметрової стрічки розглянемо SMD 3528, де 60 світлодіодів на 1 п.м.. Його потужність на 1 погонний метр – 4,8W. Додаємо запас 25% на втрати у з'єднаннях та провідниках і отримаємо:

$$\text{Довжина } 3 \text{ м} \cdot 4,8 \text{ Вт (питома потужність 1 метра)} \cdot 1,25 \text{ (запас)} = 18 \text{ Вт.}$$

Нам підійде будь-який драйвер блоку живлення потужністю 20 Вт і більше та напругою 12В.

4.7.3 Вибір корпусу. Для цього роблять корпуси з різним рівнем пилозахисту та вологозахисту, в виконанні алюмінієвому або пластиковому корпусі з природним або примусовим охолодженням.

Ступінь захисту залежить від умов експлуатації, тож вибираємо. За високої вологості (наприклад, розміщення у теплиці) ступінь захисту має бути не менше IP67.

Матеріал корпусу можна вибрати на свій розсуд,. Переваг будь-який ніяких не дає.

За високої потужності блоку живлення необхідне примусове охолодження його (понад 200Вт). В іншому випадку зазвичай досить пасивного охолодження.

Прилади живлення можуть бути обладнаними дистанційним керуванням з пульта, що забезпечується екранами, та мати таймери. Додаткове обладнання беріть за бажанням. Що більше функцій - тим коштовніше блок живлення.

Варіант підключення світлодіодних стрічок до блоку живлення наведено на рис. 4.6

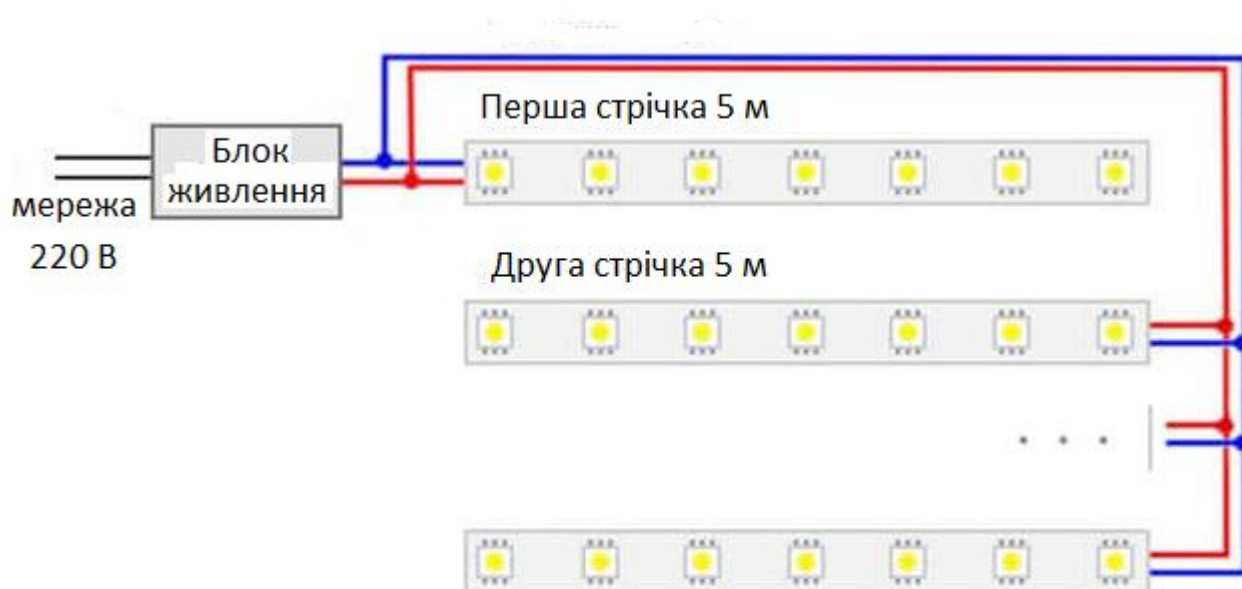


Рисунок 4.6 – Схема підключення світлодіодних стрічок до блоку живлення

Всі відрізки стрічки підключаються паралельно з блоком живлення. При підключенні використовуємо спеціальні коннектори. Єдиний нерозривний відрізок стрічки перевищувати довжини 5м не повинен.

Також необхідно враховувати клас захисту встановленої світлодіодної стрічки для блоку живлення і рослин.

## ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі розглянуті основні типи, конструкції, складові та характеристики випромінювачів, що використовуються для освітлення у процесі вирощування побутових та промислових рослин.

Проаналізовано методи вимірювання спектральних характеристик випромінювачів.

Докладно розглянуті світлодіодні випромінювачі, їх спектральні характеристики, електричні та ергономічні параметри, можливості синтезу складної спектральної характеристики шляхом використання декількох компонентів.

Проаналізовано основні вимоги до освітлення рослин виходячи з максимальної ефективності засвоєння потужності випромінювання для фотосинтезу.

Виконано порівняльний аналіз ефективності традиційних освітлювачів для рослин, розроблені рекомендації з їх використання.

Розроблено склад, конструкцію, компоновку та варіант підключення системи освітлення для конкретного варіанту побутового парнику. Вибрано тип світлодіодної стрічки та параметри блоку живлення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. – М.: Высш. шк., 1983. – 304 с.
2. Шарупич Л.С., Тугов Н.М. Оптоэлектроника [учеб.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
3. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. 9-е изд. – К.: Техніка, 1980. – 464 с.
4. Быстров Ю.А. Оптоэлектронные приборы и устройства. – М.: Высш. шк., 2001. – 284 с.
5. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов / пер. с англ. В.Н. Осипова. – Л.: Знамя, 1970. – 230 с.
6. Тарасов К.И. Спектральные приборы. – М.: Мир, 1968 – 468 с.
7. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника / пер. с нем. С.Г. Тимошина. – М.: Мир, 1976. – 365 с.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / пер. с нем. Л.В. Николаевой. – М.: Мир, 1984. – 640 с.
9. Абрамов В.С. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов. – К.: Наука, 2002. – 289 с.
10. Подсветка комнатных растений в зимнее время. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/406663> (Дата звернення 3.10.2019 р.).
11. Галат А.Б. Расчет поглотительной способности солнечного фотопреобразователя на основе  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  // Радиотехника, 2017. – Вып. 190. – С.44-49.
12. Освещение растений белыми светодиодами. – Режим доступа: <https://teplitca.kiev.ua/a344809-osveschenie-teplicnogo-sooruzheniya.html> (Дата звернення 6.10.2019 р.).

13. КПД светодиодного светильника. – Режим доступа:

<https://svetodiodinfo.ru/tehnicheskie-momenty/kpd-svetodiodov.html> (Дата  
звернення 3.10.2019 р.)

