

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ імені Івана Пулюя**

На правах рукопису

КОЗАК КАТЕРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 628.9:621.311.1.004.183

**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ДЖЕРЕЛ СВІТЛА ТА ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник
Карпінський Микола
Петрович, доктор
технічних наук,
професор**

***Ідентичність усіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:***
*Учений секретар
Спеціалізованої вченої ради К 58.052.04*

Тернопіль – 2014

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ПОЗНАЧЕННЯ.....	6
ІНДЕКСИ.....	7
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ, СВІЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА НА ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.....	21
1.1. Сучасні проблеми енергозбереження в освітленні.....	21
1.2. Аналіз джерел світла з точки зору енергоефективності.....	23
1.3. Аналіз впливу фізичних принципів дії та схем ввімкнення джерел світла на пульсації світлового потоку	28
1.4. Аналіз сучасних способів регулювання світлового потоку джерел світла з точки зору енергоефективності.....	34
1.5. Визначення енергоефективності джерел світла.....	38
1.6. Висновки з розділу 1.....	50
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ, СПЕКТРАЛЬНИХ, СВІЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА.....	53
2.1. Залежність номінальних світлових віддач джерел світла від номінальних потужностей.....	53
2.2. Гранично можливі світлові віддачі джерел білого світла.....	67
2.3. Вплив геометричних параметрів люмінесцентних ламп на динаміку електричних і світлотехнічних характеристик в процесі поступової зміни частоти напруги живлення.....	74
2.4. Висновки з розділу 2.....	89

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В СТАЦІОНАРНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	91
3.1. Динаміка світлового потоку джерел світла в процесі експлуатації протягом середньої тривалості світіння.....	91
3.2. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку теплових джерел світла при зміні номінальної світлової віддачі та димеруванні	94
3.3. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку по довжині кольорових і з різною колірною температурою люмінесцентних ламп.....	97
3.4. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку прямих люмінесцентних ламп в складі світильника з розщепленою фазою	100
3.5. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку прямих і компактних люмінесцентних ламп при димеруванні.....	103
3.6. Динаміка електричних і світлотехнічних параметрів розрядних ламп високого тиску при розгоранні та димеруванні.....	105
3.7. Особливості електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових джерел світла.....	114
3.8. Висновки з розділу 3.....	127
РОЗДІЛ 4. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА.....	130
4.1. Розробка системного підходу оцінки енергоефективності джерел світла.....	130
4.2. Енергоефективність регулювання світлового потоку на прикладі теплових і напівпровідникових джерел світла.....	141
4.3. Енергетична ефективність та електромагнітна сумісність існуючих способів регулювання світлового потоку.....	155
4.4. Концепція конструктивного виконання безблискісних світлодіодних світильників.....	161

4.5. Особливості освітлення автомобільних доріг і пішохідних переходів.....	166
4.6. Висновки з розділу 4.....	173
ВИСНОВКИ.....	175
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	178
ДОДАТОК А Акт впровадження результатів дисертаційної роботи .у навчальний процес ТНТУ ім. І. Пулюя.....	197
ДОДАТОК Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи на ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА»	198
ДОДАТОК В Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в ТОВ «ВВ».....	199
ДОДАТОК Г Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в ПП «ЛОКУС ПЛЮС».....	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

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

СДЛПЗ	–	світлодіодна лампа прямої заміни
СТС	–	середня тривалість світіння
ТДС	–	теплове джерело світла
ШІМ	–	широтно-імпульсна модуляція

ПОЗНАЧЕННЯ

ΔD	–	додаткові витрати, грн
η	–	ККД, %
Λ	–	дифузійний розмір колби ЛЛ
λ	–	довжина хвилі електромагнітного випромінювання, нм
τ	–	середня тривалість світіння, год
τ_D	–	характерний час амбіполярної дифузії, сек
χ	–	коефіцієнт для врахування втрат потужності в мережах і ПРА
C	–	вартість, грн
d	–	діаметр, мм
E	–	освітленість, лк
E	–	енергоефективність
F	–	світловий потік, лм
f	–	частота напруги живлення, Гц
H	–	світлова віддача, лм/Вт
$I(i)$	–	діюче (миттєве) значення струму, А
k	–	коефіцієнт, відн. од.
k_B	–	стала Больцмана, Дж/К
K_{\max}	–	коефіцієнт пропорційності, який називають максимальною світловою ефективністю випромінювання
l	–	відстань, мм
m	–	відносна напруга на розрядній лампі, $m = U_{\text{л.ном}} / U_{\text{м}}$
N	–	кількість, шт
N_p	–	ємність ринку, шт
P	–	активна потужність, Вт

ΔP	– втрати активної потужності, Вт
Q	– світлова енергія, Млм×год
q	– тариф на електричну енергію, грн/(кВт×год), вартість одиниці світлової енергії
qP	– вартість одиниці питомої світлової енергії, грн×Вт/(Млм×год)
r	– радіус, мм
R	– опір, Ом
R_a	– індекс кольоропередачі
S	– площа, м ²
t	– час, с
t°	– температура, °С
T	– число годин використання освітлювального навантаження за рік, год
T_K	– колірна температура, К
$U(u)$	– діюче (миттєве) значення напруги, В
ΔU_a	– анодне падіння потенціалу, В
$\Delta U_{ак}$	– анодно-катодне падіння потенціалу, В
$\Delta U_{ввс}$	– падіння напруги на відпрацьованих витках спіралі катодів ЛЛ, В
ΔU_K	– катодне падіння потенціалу, В
$U_{пс}$	– падіння потенціалу на позитивному стовпі розряду, В
W_A	– активна електроенергія, кВт×год
$W_{рс}$	– реактивна енергія спотворень, вар
ΔW	– економія електричної енергії, кВт×год

ІНДЕКСИ

а	– анод
гаус	– гауссоїда
д	– день
дім	– димерування
диф	– диференціальний

др	— дросель
дс	— джерело світла
ел	— електроенергія
ек	— електрод ЛЛ
зап	запас
зр	— зарядка (акумулятора)
ІЗП	— імпульсний запалюючий пристрій
к	— катод, корпус
л	— лампа
м	— мережа
max	— максимальне значення
min	— мінімальне значення
н	— нормоване значення певної величини (результат ділення біжучого значення певної величини на її номінальне значення з НТД), відн. од.
ндс	— напівпровідникового джерела світла
ном	— номінальне значення величини
нч	— ніч
ОП (оп)	— освітлювальний прилад (освітлювальне приміщення)
опт	— оптична (підсистема)
оу	— освітлювальна установка
п	— пульсації
пк	— під кривою (гауссоїдою)
ПРА	— пускорегулювальний апарат
пс	— позитивний стовп розряду
р	— рік, реально досяжні значення
св	— світильник
сп	— спотворення, спіраль
ср	— середнє значення
ст	— стартер, статичний
сх	— схема

- тр – трубка (колба) ЛЛ
- ут – утилізація
- Σ – сумарне значення
- – прямокутник, який обмежує вибраний діапазон електромагнітних випромінювань джерел світла у видимій області спектру

ВСТУП

Актуальність теми. Науково-технічний прогрес призвів людство до суттєвого зростання споживання паливно-енергетичних ресурсів аж до значень, при яких став проявлятися їх дефіцит. Зросла і тривалість життя людей, що призвело до суттєвого збільшення населення Землі. Якщо протягом останніх 6 тис. років ріст населення Землі відбувався за гіперболічним законом (рис. 0.1) і на початку нашої ери його чисельність дорівнювала всього 200 млн. чоловік, то з 1500 року (т. А на рис. 0.1) за мікроскопічно малий проміжок часу за історичними масштабами відбулося порушення цього закону, який діяв тисячі й тисячі років. В результаті 7 листопада 2011 року населення Землі досягло позначки 7 млрд. чоловік (т. В на рис. 0.1).



Рис. 0.1. Ріст населення Землі з початку н.е.

Розуміючи неминучість економічного і чисельного зростання населення Землі, а отже і неминучість зростання споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), міжнародне співтовариство виробило ряд нових пріоритетів енергетичної політики, орієнтуючи подальший розвиток енергетики від-

повідно до принципів сталого екологічно безпечного розвитку. Енергетична політика повинна ґрунтуватися на таких трьох китах.

Енергоощадності – організаційної, наукової, практичної та інформаційної діяльності, спрямованої на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії й природних енергетичних ресурсів.

Ефективності – сукупності показників, які дають змогу порівнювати різні вироби однакового призначення з погляду споживання енергії. Класи енергетичної ефективності, запроваджені Євросоюзом, визначають рівень економі-

чності енергоспоживання виробу, що характеризує його енергоефективність на стадії експлуатування.

Екологічній безпеці – сукупності дій, станів і процесів, що прямо або опосередковано не призводять до життєво важливих втрат, які наносяться природному середовищу.

В повній мірі це відноситься і до світлотехнічної галузі, яка виключно на освітлення споживає близько 2650 ТВт×год електроенергії в рік ($\approx 19\%$ від глобального виробництва), перевищуючи сумарне її виробництво всіма атомними електростанціями світу. І це при тому, що в країнах з населенням близько 2 млрд. чоловік (Південна Азія і Субсахарна Африка), де спостерігається дефіцит електроенергії, масово використовується гасове освітлення, ефективність якого в 100 раз менша, ніж у ламп розжарення (ЛР). Тому для обмеження об'ємів енергоспоживання на освітлення, не погіршуючи його якості і враховуючи неминуче зростання кількості споживачів, необхідно інтенсивно впроваджувати останні наукові досягнення у цій сфері за рахунок:

1. Збільшення частки:

а) новітніх напівпровідникових джерел світла – світловипромінюючих діодів, для яких характерні великі світлова віддача (до 200 лм/Вт) та середня тривалість світіння (до 50 тис. год), компактність, безінерційність, можливість експлуатації від генераторів сонячної енергії, простота реалізації функції регулювання світлового потоку та отримання на їх основі різноманітних дизайнерських рішень;

б) високоефективних люмінесцентних ламп Т8 (замість Т12 і Т10), у яких на 10 % менша споживана потужність при більшому світловому потоці; на 20 % менші витрати на логістику (вага і об'єм менші на 20 % за рахунок меншого діаметра колби); на 1 рік більша середня тривалість світіння (СТС);

в) розрядних ламп високого тиску типу ДНаТ для зовнішнього освітлення, у яких найбільші, у порівнянні з іншими джерелами світла, світлова віддача (для 150 Вт – 117 лм/Вт, для 250 Вт – 133 лм/Вт) і СТС (для 150 Вт – 32 000 год, для 250 Вт – 40 000 год, для 250 Вт – 48 000 год).

2. *Витіснення* теплових джерел світла (ТДС) високоефективними компактними люмінесцентними лампами (КЛЛ) з суттєво більшою середньою тривалістю світіння (15 000 год при комутаційному циклі 90 хв включено – 15 хв виключено, проти 1000 год у ламп розжарення загального призначення), в 4 рази більшою світловою віддачею, необмеженою можливістю застосування для мереж постійної напруги (176-310 В) та великим числом комутаційних циклів до 500 000 раз протягом всього терміну експлуатації.

3. *Стабілізації (обмеження) напруги (перенапруг)* живлення як одного з найбільш шкідливих явищ, які характерні для освітлювальних установок (ОУ) великих промислових підприємств. Досвід роботи промислових ОУ показує, що у зв'язку з нерівномірністю графіків електричного навантаження в освітлювальних мережах виникають відхилення напруги від номінального значення на мінус 10 плюс 25 %. При річному числі годин використання освітлення рівному 3600 год, напруга протягом близько 660 год перевищує номінальне значення на 10 %. Це призводить до суттєвих перевитрат електроенергії на освітлення і падіння СТС джерел світла.

4. *Раціоналізації* систем управління освітленням. Своєчасне вмикання і вимикання освітлення з урахуванням існуючого режиму роботи підприємства (наприклад на обідню перерву, залишаючи ввімкненим лише чергове освітлення), узгодження роботи штучного освітлення з динамікою природного освітлення (з метою максимального використання останнього), а також забезпечення регулювання штучного освітлення протягом робочої зміни (динамічне освітлення) дає можливість отримати значну економію електроенергії.

5. *Забезпечення* високих значень коефіцієнта потужності (КП) та електромагнітної сумісності ОУ з мережею живлення.

Зрозуміло, що ефективність кожного з перелічених заходів не може бути однаковою. При виборі джерел світла (ДС) основна увага приділяється значенням світлової віддачі і середній тривалості світіння. Чим вони більші, тим кращим вважається ДС. При цьому питання щодо динаміки зміни параметрів ДС в процесі експлуатації залишаються поза увагою. Часто без належних експери-

ментальних досліджень акцентується увага на перевагах того чи іншого режиму експлуатації ДС. Так, завжди вважалося і вважається дотепер, що проста заміна електромагнітних пускорегулювальних апаратів (ЕмПРА), необхідних для запалювання та стабілізації розряду в розрядних лампах, на електронні (ЕПРА), автоматично призводить не тільки до уповільнення динаміки спаду світлового потоку в процесі експлуатації, зростання середньої тривалості їхнього світіння, але й до економії електричної енергії. Насправді, тривалі експериментальні дослідження, проведені в Росії у 2010-2013 рр. в реально діючих освітлювальних установках зовнішнього освітлення на основі РЛВТ типу ДНаТ фірми OSRAM, показали, що ніяких переваг ЕПРА над ЕмПРА не мають, а наявність економії електроенергії спостерігається лише при завищених до 230 В напругах мережі.

Найбільш перспективним ДС в теперішній час є напівпровідникові, для яких відома математична модель Еберса-Молла, отримана для звичайних не випромінюючих світлодіодів, не підходить. Для світловипромінюючих світлодіодів найкраще підходить рівняння Шоклі, з якого можна отримати вираз для побудови лише очікуваних вольт-амперних характеристик (ВАХ). Очікуваної тому, що в зазначений вираз входить коефіцієнт неідеальності вольт-амперної характеристики, який лише для ідеальних діодів дорівнює 1. Для реальних світлодіодів величина цього коефіцієнта знаходиться в межах від 1 до 2. Крім того, у діодів в процесі виготовлення часто виникають паразитні опори, які помітно впливають на форму ВАХ. Саме тому реальні вольт-амперні характеристики, необхідні для аналізу енергоефективності напівпровідникових джерел світла та освітлювальних установок на їх основі, відрізняються від теоретичних. Це вказує на необхідність розроблення математичних моделей електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла, придатних для визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

Таким чином, для забезпечення об'єктивності оцінки енергоефективності варіантів освітлення необхідно врахувати всі фактори, які впливають на еконо-

мічну ефективність впровадження кожної конкретної інновації. Для цього потрібно мати відповідний системний підхід до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їх вибору та реалізації в усіх сферах людської діяльності.

Питаннями підвищення енергоощадності освітлювальних установок, розробки методів оцінки енергоефективності, дослідження електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик теплових, розрядних і напівпровідникових джерел світла займалися такі вчені як: Кунгс Я.А., Рохлін Г.М., Кримов А.В., Нікітін В.Д., Іванов А.П., Скобелев В.М., Айзенберг Ю.Б., Барінова І.А., Краснопольский О.Є., Тарасенко М.Г., Пилипчук Р.В., Зотін О.А., Семенов Ю.Б., Літвінов В.С., Rajeckі K., Zaremba K., Putz Ł., Nawrocki R., Pawlak A., Weinert J., Spaulding C., Shen M., Qian Z., Peng F., Griffiths T., Кириленко А.І., Соловьев А.К., Кликов М.Є., Кожушко Г.М., Юнович А.Е. та ін. Незважаючи на це, низка питань так і залишилася не до кінця вирішеною, а саме: *процес формування* основних параметрів енергоефективності джерел світла; *розроблення* системного підходу щодо визначення енергоефективності джерел світла; *динаміка* номінальних світлових віддач в процесі зростання потужності для всіх типів джерел світла; *динаміка* електричних і світлотехнічних параметрів прямих люмінесцентних ламп з різними геометричними параметрами при поступовій зміні частоти напруги живлення; *динаміка* електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів в процесі розгорання, регулювання світлового потоку та стаціонарної експлуатації існуючих типів теплових, розрядних (низького і високого тиску) та напівпровідникових джерел світла; *визначення* меж регулювання світлового потоку з точки зору енергоефективності; *розроблення* концепції конструктивного виконання безблискісних світлодіодних світильників.

Саме це і зумовило **актуальність** проведення робіт, спрямованих на:

- а) *встановлення* залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей джерел світла;
- б) *дослідження* впливу геометричних параметрів люмінесцентних ламп на електричні і світлотехнічні характеристики при поступо-

вій зміні частоти напруги живлення; в) *розроблення* системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їх вибору при реалізації проектів освітлення; г) *дослідження* енергоефективності регулювання світлового потоку джерел світла; д) *розроблення* концепції конструктивного виконання безблискісних світлодіодних світильників.

Зв'язок із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є наслідком досліджень, які проводилися на спеціалізованому обладнанні у лабораторіях ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА» та Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя і є складовою частиною науково – дослідної теми: «Вплив динаміки експлуатаційних параметрів на енергоефективність джерел світла» (0113U000248).

Роль автора у виконанні вказаних робіт полягає в розробці системного підходу до оцінки енергоефективності ДС та ОУ, визначенні напрямків теоретичних, експериментальних і прикладних досліджень, особистій участі в постановці та вирішенні поставлених задач, обробці та узагальненні результатів досліджень.

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка системного підходу до оцінки енергоефективності ДС та ОУ. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувались наступні *задачі*:

1. Аналіз сучасного стану досліджень динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації і регулювання світлового потоку та методів оцінки енергоефективності освітлювальних установок, побудованих на їх основі.
2. Встановлення математичних залежностей номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для існуючих типів джерел світла.
3. Розробка методики для визначення реалістичних значень можливих змін номінальних світлових віддач (зростання або падіння) зі зростанням номінальних потужностей джерела світла.
4. Дослідження впливу геометричних параметрів люмінесцентних ламп

(діаметра і довжини) на їх електричні і світлотехнічні характеристики при поступовій зміні частоти напруги живлення.

5. Розробка системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їх вибору при реалізації проектів освітлення в усіх сферах людської діяльності (комерційній, побутовій, промисловій тощо), спираючись на задекларовані виробником номінальні параметри (потужність, світлову віддачу та середню тривалість світіння) в залежності від режимів експлуатації, цін на світлотехнічну продукцію та діючих тарифів на електроенергію.

6. Дослідження енергоефективності регулювання світлового потоку джерел світла та освітлювальних установок з точки зору системного підходу з урахуванням дії основних збурювальних факторів з метою встановлення діапазонів напруг (струмів), в яких регулювання світлового потоку є найбільш вигідним.

7. Побудова математичних моделей електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла, придатних для визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

8. Дослідження динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації та від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим.

9. Створення методики визначення оптимального номінального значення струму, розроблюваних світлодіодних світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння.

10. Розробка концепції конструювання безблискісних світлодіодних світильників.

Об'єкт дослідження – процес формування основних параметрів енергоефективності джерел світла.

Предмет дослідження – параметри джерел світла та режимів експлуатації як взаємопов'язаних елементів освітлювальних установок.

Методи дослідження. Поставлені задачі вирішувались на основі:

а) теоретико-експериментальних досліджень перехідних процесів та усталених режимів експлуатації теплових, розрядних та напівпровідникових джерел світла; б) використання програми *Advanced Grafer* та електронного редактора таблиць і діаграм *Microsoft Excel* для визначення коефіцієнтів інтерполяційних моделей; в) планування експериментальних робіт та оброблення отриманих результатів з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в науковому обґрунтуванні та вирішенні важливої науково-технічної задачі підвищення адекватності оцінки енергоефективності джерел світла на основі одночасного врахування множини збурювальних факторів, які суттєво впливають на їхні якісні та кількісні параметри в складі освітлювальних установок в процесі експлуатації. При цьому одержано такі наукові результати:

1. Уперше встановлено математичні залежності номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном}}$) для існуючих джерел світла.

2. Уперше запропоновано системний підхід до визначення енергоефективності джерел світла та ОУ з точки зору питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої джерелом світла за середню тривалість його світіння.

3. Доведено, що найкращими з точки зору енергоефективності експлуатації ДС в процесі регулювання світлового потоку є ті значення напруги для теплових і струму для напівпровідникових джерел світла, для яких характерні не тільки найменші значення нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, але й виробляється максимальна її кількість.

4. Побудована математична модель електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла у вигляді системи рівнянь, що дало можливість визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

5. Встановлено, що світловипромінюючі діоди є єдиним з існуючих джерел світла, у яких в процесі розгорання відбувається падіння як світлового потоку, так і світлової віддачі, а при димеруванні – зростання світлової віддачі.

6. Доведено, що динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку напівпровідникових джерел світла від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим з достатньою для практики точністю описується різницею падаючої і зростаючої експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування, що дає можливість оцінювати вклад кожного з теплових опорів (основа світлодіод-радіатор, радіатор-оточуюче середовище) в процес тепловідводу надлишкового тепла в оточуюче середовище від драйвера та світлодіодів.

7. Доведено, що спад світлового потоку під час перехідного процесу від моменту вмикання до переходу в усталений режим у межах до 10 % вказує на те, що при такому тепловому режимі світлотехнічного виробу середня тривалість світіння світлодіодів буде близькою до заявленого у нормативно-технічній документації номінального значення. Перевищення 10 %-ного значення спаду світлового потоку свідчить про наднормативний перегрів $p-n$ переходу світлодіодів, при якому як світлова віддача, так і середня тривалість світіння будуть нижче заявлених.

8. Запропоновано методику визначення оптимального значення номінального струму, розроблюваних світлодіодних світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння, на основі дослідження залежності відносного спаду світлового потоку від струму з моменту ввімкнення до переходу в усталений режим. Впроваджено на ТОВ «ВВ».

Практичне значення одержаних результатів. Ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень, теоретичних узагальнень та розробок, вирішені проблеми, які мають важливе народногосподарське значення:

1. Сформульовано рекомендації щодо енергоефективності регулювання світлового потоку джерел світла (без врахування і з врахуванням втрат потужності в пускорегулювальній апаратурі, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС $F(t)$ в процесі експлуатації) із визначенням діапазону напруг (струмів), в якому воно є найбільш вигідним. Для

напівпровідникових ДС характерне постійне близьке до експоненціального закону зростання енергоефективності їхньої експлуатації при збільшенні кратності регулювання світлового потоку аж до повного погасання. Врахування втрат в ПРА, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС в процесі експлуатації при розрахунках помітно впливає лише на хід залежностей для дешевих (теплових) джерел світла.

2. Запропоновано методика для визначення реалістичних значень можливих змін номінальних світлових віддач (зростання або падіння) з ростом номінальних потужностей джерел світла.

3. Запропоновано системний підхід до оцінки енергоефективності джерел світла та ОУ на етапі їх вибору при реалізації проєктів освітлення.

4. Визначено результати впливу електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик на енергоефективність джерел світла.

5. Запропоновано концепцію конструювання безблискісних світлодіодних світильників, яка ґрунтується на багатокomпонентності: переході від категорії «лампа» до категорії «освітлювальний прилад», від потужних до мало- та середньопотужних світлодіодів з перенаправленням їхніх світлових променів за допомогою відбиваючих систем та вторинної лінзової оптики таким чином, щоб осередки надяскравості не виникали.

6. Доведено, що автомобільні дороги найкраще освітлювати золотистожовтим світлом РЛВТ типу ДНаТ, а пішохідні переходи одночасно РЛВТ типу ДНаТ і спеціалізованим світлодіодними освітлювальними приладами, що дасть можливість знизити число дорожньо-транспортних пригод з участю пішоходів.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів. У поданій роботі викладено основні результати досліджень, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві, автору належить: у [1] – ідея, експериментальні дослідження, аналіз результатів та виведення основних математичних співвідношень; у [2] – аналіз фактичних даних та розробка системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла за питомою вартістю одиниці світлової енергії; у [3] – розробка методики проведення експе-

рименту, обробка отриманих результатів, формулювання висновків; у [4] – ідея, виведення основних математичних залежностей; у [5] – написання формули на корисну модель; у [6] – розробка методики проведення експерименту, експериментальні дослідження, висновки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднені та обговорені на: XVI науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 5-6 грудня 2012 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції в рамках Светотехнического международного форума «LEDLIGHT’2013» «Современные тенденции развития светотехники» (Харьков, 15-16 мая 2013 г.); XVII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 20-21 листопада 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 11-12 грудня 2013 р.).

Публікації. Результати наукових досліджень викладені у 10 наукових працях, з яких 5 статей у фахових журналах, що входять до Переліку, затвердженому наказами МОН та постановами президії ВАК України (у тому числі 2 статті у закордонних фахових виданнях у Білорусії та Польщі), 4 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях та 1 патент на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 208 найменувань на 19 сторінках та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, з них 150 основного тексту, 54 рисунка та 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ, СВІЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА НА ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

1.1. Сучасні проблеми енергозбереження в освітленні

Енергія є необхідним засобом для існування та розвитку людства. Її виробництво і споживання здійснює широкомасштабний вплив на природу та навколишнє середовище. З одного боку, в побут і виробничу діяльність людини настільки твердо увійшло тепло і електроенергія, що людина навіть і не мислить свого існування без них, тому не задумуючись споживає такі доступні та здавалось би невичерпні ресурси. З іншого боку, людина все більше і більше загострює свою увагу на економічному аспекті енергетики і потребує екологічно чистих виробництв та продукції [1].

Тому сучасний період розвитку людства здебільшого характеризують через три «Е»: енергетика, економія та екологія. Енергетика в цьому переліку займає особливе місце. Вона є визначальною як для економіки, так і для екології. Саме від неї в значній мірі залежить економічний потенціал держав та благоустрій громадян. Саме вона здійснює найбільш потужний вплив на навколишнє середовище, екосистему та біосферу в цілому. Найгостріші екологічні проблеми (зміна клімату, кислотні дощі, глобальне забруднення середовища та інші) прямо або опосередковано пов'язані з виробництвом або використанням енергії. Енергетиці належить першість не тільки в хімічному, але й в інших видах забруднення: тепловому, аерозольному, електромагнітному та радіоактивному. Тому не буде перебільшенням сказати, що від вирішення енергетичних проблем залежить і можливість вирішення основних екологічних проблем [1, 2, 3, 4]. Основою ефективної енергетичної політики сучасності повинні стати: енергобезпека, енергоефективність, енергозбереження та екологічна гармонізація суспільного розвитку [5].

Однією з основних складових в структурі енергетики є електроенергетика, яка є основою науково-технічного прогресу сучасності. Без електроенергії неможлива робота комп'ютерів і телевізорів, побутових і медичних приладів, насосів і вентиляторів, верстатів і конвеєрів, транспорту і космічних ракет, джерел світла (ДС) та освітлювальних установок (ОУ). Так склалось історично, що основною функцією освітлення є забезпечення людини необхідними умовами для комфортного і безпечного виконання потрібних задач. Людство століттями обертається навколо цієї функції, поступово вдосконалюючи її. Якщо в часи В. Шекспіра вартість одиниці світлової енергії (від сальних свічок) становила у переводі на сучасні гроші 159 000 грн/(Млм×год), то в теперішній час (від ламп розжарення потужністю 60 Вт) – 26,5 грн/(Млм×год) [6].

Глобальний за масштабом, проте неоднорідний попит на штучне освітлення ще далекий від насичення. Так, якщо середній мешканець Північної Америки щорічно споживає 101 Млм×год/рік світлової енергії, то середній мешканець Індії – лише 3 Млм×год/рік. Існуючі тенденції економічного розвитку дають підставу стверджувати, що світовий попит електроенергії на штучне освітлення буде зростати нерівномірно і до 2030 року може збільшитися на 80 % [6, 7].

Якщо дані прогнози здійсняться і темпи вдосконалення технологій не підвищаться, то світовий попит на електричне освітлення сягне 4 250 млрд. кВт×год, що майже вдвічі перевищує об'єми виробництва електроенергії всіма сучасними атомними електростанціями світу. В теперішній час у масштабах планети на електричне освітлення використовується близько 19 % від загального виробництва електроенергії. При цьому лампи розжарення (ЛР) споживають третину, а інші ДС – 67 % електроенергії [6, 7, 8].

У глобальному масштабі динаміка об'ємів використання електроенергії на освітлення за призначенням наступна: а) вуличне – 8 %; б) промисловий сектор – 16 %; в) житловий сектор – 28 %; г) сектор обслуговування – 48 % [9].

В Україні на освітлення витрачається близько 15 % (27 млрд. кВт×год) електроенергії в рік. Якщо на душу населення, то це як і в розвинутих країнах світу, але при вкрай неефективному її споживанні. Так, річні рівні світло-

споживання в Україні складають приблизно 42 Млм×год/люд., в той час як в США – 100-110 Млм×год/люд. [10]. Це обумовлено: а) великою часткою низькоефективних ДС (35 % ЛР, проти 20 % у західних країнах); б) малою часткою енергоефективних люмінесцентних ламп (ЛЛ) Т8 та Т5 в секторі суспільних і адміністративних будівель; в) відсутністю публікацій і комплексних досліджень поведінки енергоефективних ЛЛ на низьких і високих частотах; г) відсутністю науково обґрунтованої концепції щодо енергоефективних зон та методів управління ОУ в залежності від їх призначення [11].

1.2. Аналіз джерел світла з точки зору енергоефективності

Рациональне використання електроенергії і коштів на потреби освітлення може бути забезпечено, в основному, за рахунок енергоефективних ДС. На сьогодні в різних сферах людської діяльності використовуються головним чином чотири групи ДС: 1. *Теплові ДС* (ТДС) (ЛР, та кварцово-галогенні ЛР), які де-

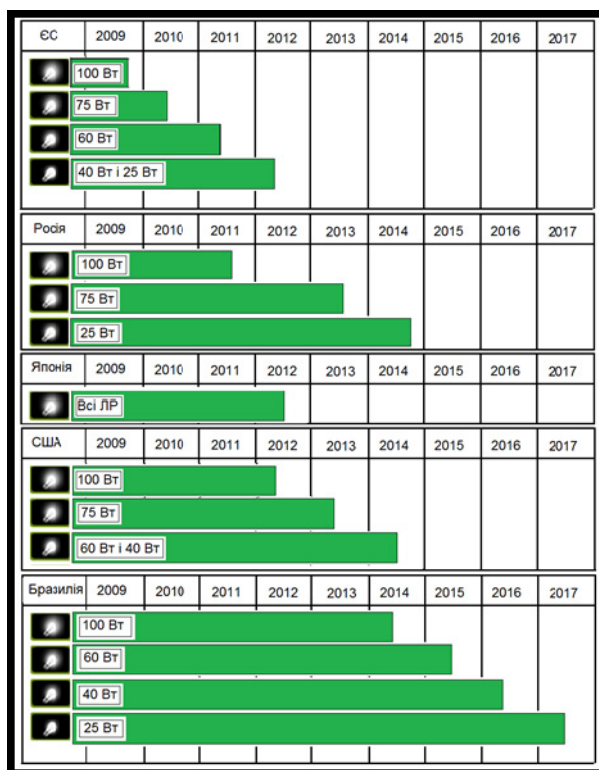


Рис. 1.1. Процес поетапного вилучення ламп розжарення урядами багатьох країн [16]

шеві, зручні у користуванні, легко піддаються регулюванню, мають привабливий вигляд і не втратили можливості щодо збільшення світлової віддачі до 60-100 лм/Вт та середньої тривалості світіння (СТС) до 5-15 тис. год [12, 13]. Не зважаючи на це, ЛР загального призначення (ЛРЗП) запропоновано поетапно (рис. 1.1) вилучити з ужитку як енергонеефективні [14, 15]. Але це не призвело до вилучення їх з продажу. В більшості країн світу ЛР почали продавати як «обігрівачі кульки» з надзвичайно високим тепловим ККД $\geq 95\%$ [17]. У кварцово-галогенних ЛР

(КГЛР) більші як світлова віддача, так і СТС, що дає можливість економити до

30 % електроенергії. Поява на ринку капсульних КГЛР у прозорих та матових колбах на напругу 220 В за ціною ламп загального призначення підсилила їх позиції в побутовому секторі [18]. Ця категорія ТДС не підлягає забороні в найближчому майбутньому.

2. *Люмінесцентні лампи* (лінійні, компактні й безелектродні), у яких ультрафіолетове випромінювання ртутного розряду перетворюється у видиме за допомогою люмінофорів. Компактні ЛЛ (КЛЛ) були створені спеціально для заміни ЛР, але досить швидко з'ясувалося, що: а) їх необхідно утилізувати спеціальним чином (у кожній знаходиться не менше 5 мг ртуті), а як змусити до цього громадян України не запропонували [19]; б) у них через більш складну форму й більш значні відносні навантаження на люмінофор менша не тільки світлова віддача, ніж у прямих ЛЛ, але й середня тривалість світіння (СТС); в) задеклароване виробниками співвідношення 1:5, яке характеризує економію електроенергії при переході від ЛР до КЛЛ, на практиці не перевищує 1:4; г) вони чутливі до режиму частих увімкнень – витримують 3 000 циклів вмик./вимик. на 8 000 годин напрацювань; д) у них відбувається зміна кольору випромінювання під час розгорання, яка сприймається людським оком у процесі зростання світлового потоку протягом перших 10 хв після увімкнення [20].

Принцип дії безелектродної низькочастотної ($f = 250$ кГц) люмінесцентної лампи оснований на застосуванні ідеї кругового індуктивного розряду. Кільцева ЛЛ охоплюється двома кільцевими феритовими магнітопроводами, на які нанесені обмотки, з'єднанні між собою послідовно узгоджено. В результаті утворюється трансформатор, у якому функції вторинної обмотки виконує замкнений дуговий розряд. Енергоефективність лампи визначається втратами у фериті і тиском буферного газу (криптон) в лампі. Для мінімізації втрат у фериті відношення втрат в магнітопроводі P_M до потужності розряду P_p , яке визначається за виразом $P_M / P_p \sim (I_p)^{-1,5}$ (де I_p – розрядний струм), повинно бути мінімальним. Саме тому розрядний струм у цих ламп завжди великий – від 7,1 А для потужності 70 Вт до 11,5 А для – 150 Вт. Основні переваги: велика СТС до 60 000 год, миттєвий запуск, швидке розгорання – 10 с, стабільна робота в широкому діапазоні температур до мінус 40°C.

3. *Розрядні лампи високого тиску (РЛВТ)*, використовуються у наступних трьох варіантах: 1) ртутному – це лампи типу ДРЛ; 2) ртутному, з домішками галоїдних сполук з рідкоземельними металами – це лампи типу ДРІ; 3) ртутно-натрієвому – це лампи типу ДНаТ. Обсяги виробництва цих ламп посідають третє місце після ТДС і ЛЛ і складають близько 10 % від обсягу виробництва ЛЛ (300 млн. шт/рік).

4. *Напівпровідникові ДС (НДС)*, робота яких пов'язана з протіканням електричного струму через *p-n* перехід і рекомбінацією носіїв заряду в забороненій зоні. В результаті у середньостатистичному світлодіоді переважна більшість спожитої енергії перетворюється в тепло (ККД не перевищує 22-28 %). Тому завжди, якою б не була температура оточуючого середовища, існує вплив власного нагрівання кристалу, кристалотримача та інших складових конструкції на весь комплекс електричних і світлотехнічних параметрів світлодіодів [21, 22, 23]. На лютий 2013 р. рекорд світлової віддачі для лабораторних зразків білих світлодіодів склав 276 лм/Вт [24], а серійні підійшли до 200 лм/Вт [25].

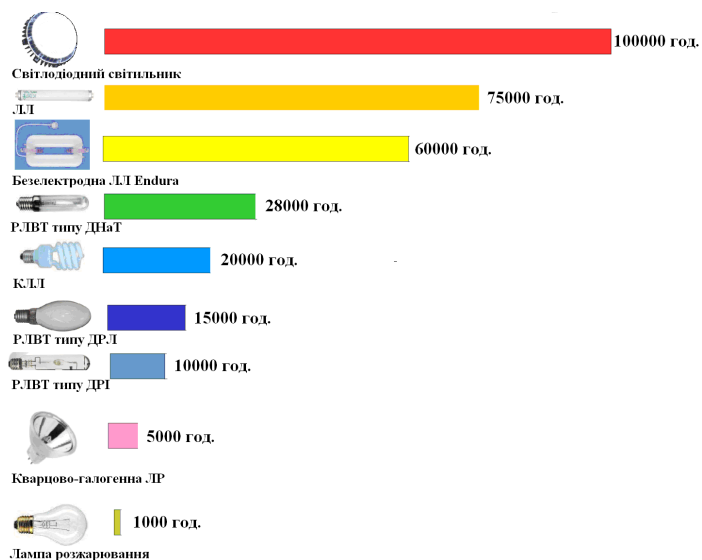


Рис. 1.2. Типові значення середньої тривалості світіння існуючих ОП і джерел світла

Рубежі, близькі до теоретичних можливих значень у 283 лм/Вт, свідчать про високу степінь довершеності їх конструкцій. СТС світлодіодів 25-50 тис. год. характеризується не повним виходом їх з ладу, як це притаманно для традиційних ДС, а падінням світлового потоку до 70-50 % від номінального значення. СТС, яка за даними виробників може

сягати 100 000 год (див. рис. 1.2), практично не підтверджена, і тому на нашу думку є сумнівною. Для НДС характерні дуже висока яскравість (їх так і називають надяскравими, а не високоефективними) і вартість. Зате вони без інер-

ційні, компактні, прості в регулюванні світлового потоку в діапазоні від 0 до 100 %, дають можливість отримання на їх основі різноманітних стилістичних рішень.

У теперішній час найбільше застосування світлодіоди знайшли в автомобільній промисловості при виготовленні фар, світлосигнальних і габаритних вогнів та світлофорів. Вони добре підходять для світлової реклами, інформаційних табло на дорогах, сигнальних вогнів, архітектурного освітлення, підсвічування фонтанів тощо. За даними аналітичної компанії LEDinside, яка спеціалізується на ринку світлодіодів, планшети і смартфони в 2014 році все ще будуть в центрі уваги світлодіодного ринку. Що стосується освітлювальних приладів, то кількість світлодіодних модулів і приладів для освітлення буде постійно зростати. Прогнозується зростання освітлювальних приладів як на ринках комерційного, вуличного, промислового, так і побутового освітлення (рис. 1.3,б) [26], за рахунок витіснення конкуруючих ДС (рис. 1.3,а). Динаміка цього процесу буде залежати від темпів та ефективності усунення недоліків притаманних НДС, основним з яких є ціна, а також недостатня якість світла (низький індекс кольоропередачі й висока колірна температура) та проблеми з тепловід-

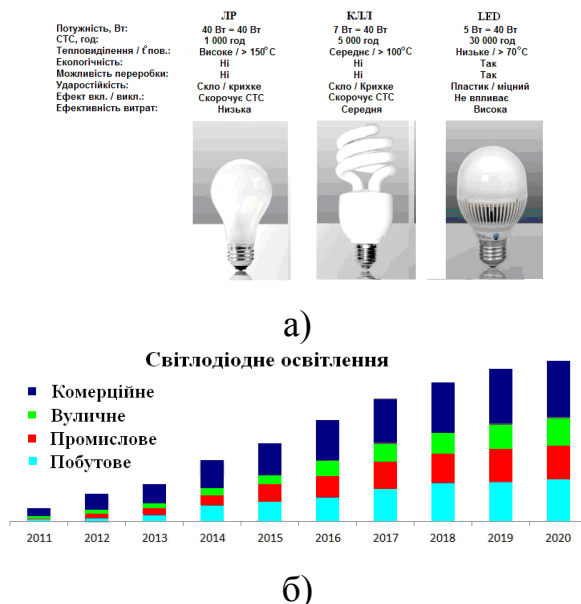


Рис. 1.3. Динаміка: а – параметрів ДС від фізичних принципів роботи; б – ринку світлодіодної продукції

водом [27-42]. Останні дослідження показали, що енергоефективність НДС прямої заміни помітно нижча, ніж у окремо взятих світлодіодів [43]. Це пояснюється тим, що світлова віддача НДС залежить від декількох факторів і визначається за наступною формулою

$$H_{\text{ндс}} = H_{\text{сд}} \cdot \eta_{\text{ел}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot \eta_{\text{ет}} \quad (1.1),$$

де $H_{\text{сд}}$, $H_{\text{ндс}}$ – світлова віддача окремо взятого світлодіода та НДС прямої заміни, виготовленого з певної кількості

окремо взятих світлодіодів, при заданій температурі $t_{\text{к}}^{\circ}$ корпусу;

$\eta_{\text{ел}}$, $\eta_{\text{опт}}$ – ККД електричної ($\eta_{\text{ел}} = 0,75 - 0,80$) і оптичної ($\eta_{\text{опт}} = 0,50 - 0,95$) підсистем НДС прямої заміни [43, 44];

$\eta_{\text{ет}}$ – коефіцієнт ефективності тепловідводу, який характеризує зменшення світлового потоку при підвищенні температури корпусу світлодіода від $t_{\text{к}}^o$ у середні працюючої лампи ($\eta_{\text{ет}} = 0,85 - 0,98$).

Таким чином, якщо в НДС прямої заміни використовуються світлодіоди зі світловою віддачею 100 лм/Вт, то світлова віддача такої лампи може бути від 32 до 74 лм/Вт, а в середньому – близько 53 лм/Вт. Виявляється, що низька споживана потужність не виправдовує відсутність радіатора. Дослідження показали, що в НДС прямої заміни без радіатора СТС не перевищує 1000 год. [43]. Проблема відводу тепла особливо гостро стоїть при створенні потужних НДС прямої заміни. Застосування потужних радіаторів помітно збільшує їх розміри й вагу. Необхідність застосування радіаторів і особливості випромінювання світлодіодів в одну напівсферу утруднює створення на їх основі ДС зі світлорозподілом подібним до ламп розжарення загального призначення [43].

З вищевикладеного випливає, що для підвищення енергоефективності ОУ в першу чергу потрібно впроваджувати вискоелективні джерела світла, до яких відносяться розрядні лампи низького (для адміністративних і комерційних будівель лінійні ЛЛ, а для побутового сектору – КЛЛ) і високого (для промислового освітлення лампи типу ДРЛ, ДРІ, дугові ртутно-вольфрамові (ДРВ) й зовнішнього – лампи типу ДНаТ) тиску, а також світловипромінюючі діоди, які потребують на даному етапі суттєвого покращення їхніх техніко-економічних параметрів. Усі перелічені джерела світла, на відміну від ТДС, потребують застосування пускорегулювальної апаратури. ПРА для розрядних ламп повинні забезпечувати надійне запалювання й стабілізацію розряду, при необхідності керування світловим потоком і захист від аварійних режимів. ПРА для НДС прямої заміни повинні з високою точністю підтримувати струм в усіх послідовно-паралельних ланках зі світлодіодами або температуру радіатора, на якому вони закріплені.

При необхідності бажано, щоб за їх допомогою могли бути реалізовані такі функції, як автоматичне регулювання світлового потоку й колірної температури в залежності від рівня природного освітлення й часу доби, а також дистанційне керування по інфрачервоним каналам і радіоканалам [45]. У загальному випадку всі ПРА повинні забезпечувати добру електромагнітну сумісність із мережею живлення й високий коефіцієнт потужності.

1.3. Аналіз впливу принципу дії та схем ввімкнення джерел світла на пульсації світового потоку

Низькочастотна мінливість природного світла, коли Сонце час від часу закривають світлі хмари, як правило позитивно впливає на організм людини. В той час як сучасні ДС, особливо розрядні, випромінюють світловий потік, який коливається з подвоєною частотою напруги мережі, нав'язуючи свій 100-герцовий ритм всьому організму [46]. Звичайно, пульсації такої частоти не сприймаються людським оком, та все ж їх негативний вплив на самопочуття (постійне скорочення м'язів вій ока призводить до їх втомлюваності і розвитку короткозорості [47], пригнічення психіки, зниження працездатності, підвищення втомлюваності тощо) та сприйняття людиною оточуючих предметів (стробоскопічний ефект – явище сприйняття швидко рухомих предметів в умовах пульсуючого освітлення нерухомими або такими, що рухаються повільно з будь-якою, відмінною від істинної, частотою і в довільному напрямку) беззаперечний. Отже, пульсації як явище – це модуляція світлового потоку лампи, обумовлена флуктуаціями миттєвих значень напруги мережі живлення [48, 49, 50]. При цьому, як показали дослідження американських вчених Вілкінса і Кларка, флуктуації миттєвих значень напруги живлення ламп при пульсаціях короткохвильового випромінювання сприймаються людиною найсильніше [51, 52].

Пульсації світлового потоку існуючих ДС неодноразово досліджувалися вченими різних країн щодо їх негативного впливу на здоров'я та працездатність

людини [48, 51-55]. Роботи [54, 56, 57] стали базовими при створенні існуючих нормативних документів. Саме з них випливають нормативи 5 % і 300 Гц [58]. Доведено, що величина пульсацій ЛЛ обумовлена малою тривалістю післясвітіння люмінофору і просвічуванням розряду через нього. Вклад люмінофору в світловий потік ЛЛ складає приблизно 90 %. Найбільш інерційними є голофосфатні люмінофори. Рідкоземельні люмінофори менш інерційні, саме тому пульсації світлового потоку у ЛЛ на їх основі більші [53].

Існуючі пропозиції щодо зниження пульсацій світлового потоку зводяться до: а) розроблення люмінофорів з великим часом післясвітіння; б) живлення ЛЛ струмом прямокутної форми; в) живлення високочастотним струмом ($f > 20$ кГц). Зниження коефіцієнта пульсації випромінювання люмінофору з підвищенням частоти струму помітне вже при частотах 400-800 Гц [59]; г) одночасне живлення ДС струмами різних частот (основна складова 50 Гц, а в паузах – струм високої частоти) [60, 61]. Для зниження пульсацій освітленості на робочих поверхнях найбільш ефективним є застосування схем з розщепленою фазою [62] та підключення ДС на різні фази напруги живлення [63].

Для кількісної оцінки пульсацій світлового потоку ($k_{пF}$) і освітленості ($k_{пE}$) введено два показники: коефіцієнт пульсації (1.2) і амплітуда коливань світлового потоку (1.3) [48, 64, 65]

$$k_{пF} = (F_{\max} - F_{\min}) / (2 \cdot F_{\text{ср.}}); \quad k_{пE} = (E_{\max} - E_{\min}) / (2 \cdot E_{\text{ср.}}); \quad (1.2)$$

$$k_{пF} = (F_{\max} - F_{\min}) / (F_{\max} + F_{\min}); \quad k_{пE} = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}); \quad (1.3)$$

де F_{\max} (E_{\max}); F_{\min} (E_{\min}); $F_{\text{ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt$; $\left(E_{\text{ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt \right)$ – максима-

льне, мінімальне та середнє значення світлового потоку (освітленості) за період T відповідно лм (лк). Другий показник (1.3) пропонується в [48] лише для полегшення обчислень значень коефіцієнта пульсацій. У зв'язку з тим, що в нормативних документах таке поняття не згадується і принцип дії серійних прила-

дів, оснований на обчисленнях за формулою (1.2) [66, 67], надалі ми будемо оперувати лише поняттям коефіцієнта пульсацій $k_{пF}$, $k_{пE}$.

Значення коефіцієнту пульсацій освітленості, в залежності від розряду виконуваних робіт, згідно з [58, 68-70] не повинно перевищувати 5, 10, 15, 20 % або не нормуються. Найбільш жорстка норма щодо коефіцієнту пульсацій (5 %) закладена для офісних приміщень, обладнаних моніторами.

У той же час частота пульсацій в існуючих документах у явному вигляді не нормується, але згідно з проведеними медичними дослідженнями доведено, що згадані обмеження діють до частоти 300 Гц. Пульсації з частотою більше 300 Гц оком не сприймаються і тому не є шкідливими. На частоті 100 Гц мозок на пульсації світлового потоку з $k_{пF} \leq 8\%$ також не реагує. Відсутність ясності у питанні пульсацій освітленості інколи перетворюється в інструмент прощтовхування своїх джерел живлення та світових приладів на конкурсних торгах. Надмірно жорсткі вимоги призводять до росту вартості, а потрібні вони далеко не завжди [71].

Аналіз літературних джерел показав, що величина коефіцієнта пульсацій світлового потоку залежить від принципу дії ДС [46, 48, 64, 72-75]. У теплових ДС (ТДС) він найменший і знаходиться в межах від 6 % до 18 %. Його величина залежить від маси (інерційності) тіла розжарювання. Чим більша потужність, тим більше маса тіла розжарення, а значить і його інерційність щодо процесів нагрівання і остигання протягом кожного півперіоду напруги живлення (рис. 1.4). У кварцово-галогенних ламп розжарення та ж природа пульсацій світлового потоку, але є деякі особливості, пов'язані з різноманіттям їх конструкцій [53]. Слід відмітити і те, що ТДС можуть працювати і від джерел постійної напруги при умові дотримання заявлених параметрів потужності ДС. В цьому випадку пульсацій світлового потоку будуть відсутні. У люмінесцентних ламп при роботі в мережі промислової частоти (60 Гц) з електромагнітним пускорегулювальним апаратом (ЕМПРА) світловий потік пульсує з частотою 120 Гц. Коефіцієнт пульсацій охоплює діапазон від 20 % до 75 % [53, 73] (рис. 1.5, рис. 1.6). На відміну від ТДС ці джерела світла не можуть ефективно

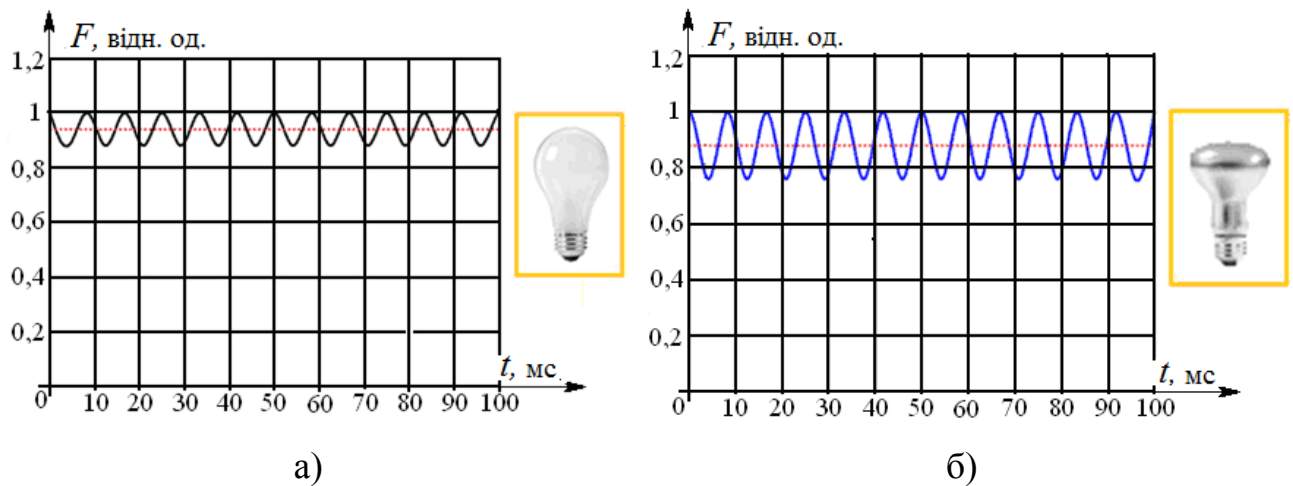


Рис. 1.4. Осцилограми пульсацій світлового потоку: а – стандартної ЛР 60 Вт А19 $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,88$; $F_{\text{ср.}} = 0,94$; $k_{\text{п}F} = 6,38\%$; б – рефлекторної ЛР 30 Вт R20 $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,76$; $F_{\text{ср.}} = 0,88$; $k_{\text{п}F} = 13,64\%$

працювати від джерел постійної напруги, тому що у них на постійному струмі виникає явище катафорезу, коли через 14-18 год безперервної експлуатації майже половина лампи не випромінює світла і світловий потік зменшується до 55 % від номінального. Потемніння половини ЛЛ обумовлено тим, що позитивні іони переміщуються до електрода з від'ємним знаком і резонансне випромінювання ліній ртуті в половині лампи, з якої ртуть перемістилася до катоду, не виникає. Використання високочастотних електронних пускорегулювальних апаратів дає можливість не тільки зменшити коефіцієнт пульсації світлового потоку ЛЛ майже до нуля, але й збільшити середню тривалість їхнього світіння [48, 53].

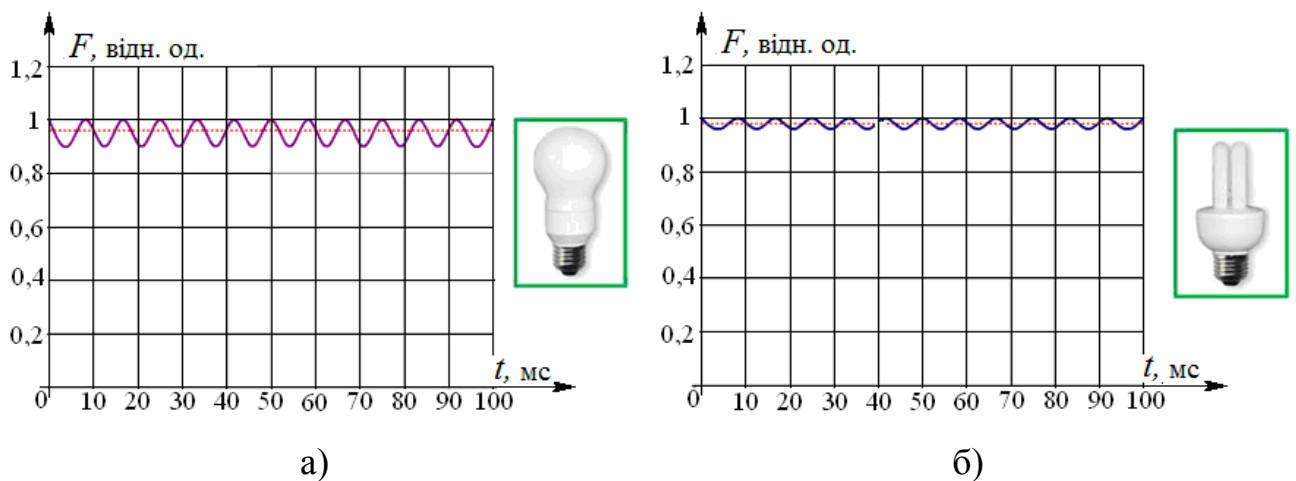


Рис. 1.5. Осцилограми пульсацій світлового потоку КЛЛ з електронним адаптером: а – А19 CFL $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,90$; $F_{\text{ср.}} = 0,96$; $k_{\text{п}F} = 5,26\%$; б – Quad Tube CFL $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,96$; $F_{\text{ср.}} = 0,98$; $k_{\text{п}F} = 2,04\%$

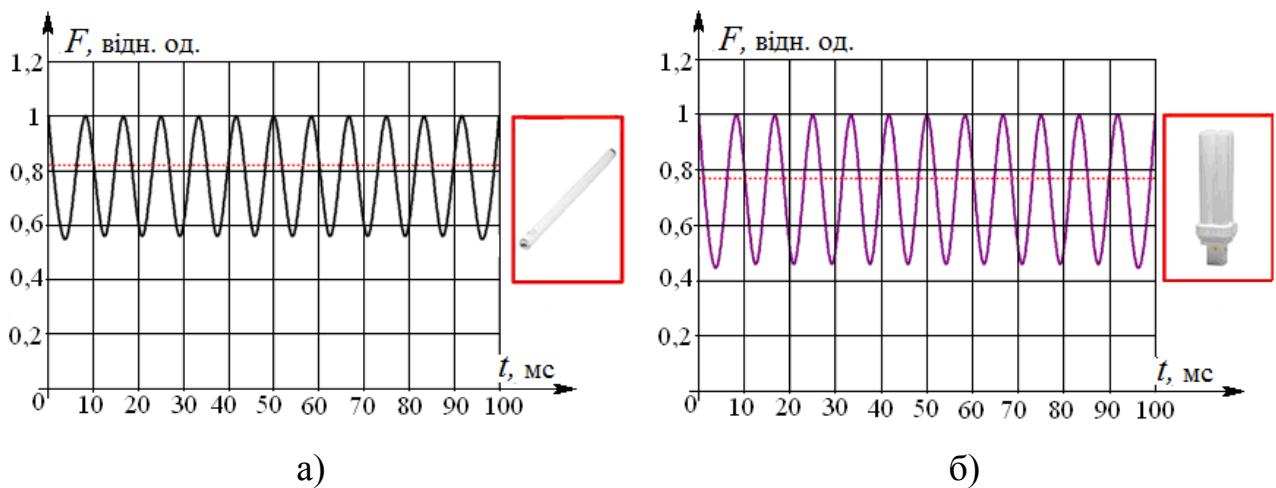


Рис. 1.6. Осцилограми пульсацій світлового потоку ЛЛ в мережі промислової частот 60 Гц в схемі з електромагнітним ПРА: а – прямі ЛЛ T12 $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,56$; $F_{\text{ср.}} = 0,82$; $k_{\text{пF}} = 28,21\%$; б – компактні ЛЛ Quad Tube CFL $F_{\max} = 1$; $F_{\min} = 0,46$; $F_{\text{ср.}} = 0,77$; $k_{\text{пF}} = 37\%$

У розрядних ламп високого тиску коефіцієнт пульсацій охоплює діапазон від 61 % до 130 % у ксенонових ламп [64]. Спроби зменшити його значення за рахунок переходу на живлення ламп постійним струмом призводять не тільки до помітного зменшення світлової віддачі комплекту активний баласт-розрядна лампа, але й до суттєвого падіння середньої тривалості їхнього світіння.

У напівпровідникових ДС (НДС), які можуть працювати лише в мережі постійного струму, коефіцієнт пульсацій визначається якістю драйвера і схемою з'єднання світлодіодів. Якщо на виході джерела живлення стоїть конденсатор, то виробник може гарантувати лише величину пульсацій вихідної напруги. Пульсації струму, які визначають пульсації світлового потоку, будуть більшими. Наскільки? Це залежить від кількості і типу з'єднаних світлодіодів. Залежність пульсацій струму світлодіодів від пульсацій вихідної напруги визначається диференціальним опором світлодіода при номінальних робочих параметрах. Чим більша крутизна робочої ділянки вольт-амперної характеристики (ВАХ), тим більший диференціальний опір ($dU_1/dI_1 > dU_1/dI_2$, рис. 1.7). При послідовному з'єднанні світлодіодів їх опори додаються, тому крутизна характеристики зменшується (крива 2, рис. 1.7). При паралельному з'єднанні світлодіодів або при використанні багато кристальних світлодіодів, з'єднаних

всередині, їх опір буде зменшуватися, а крутизна характеристики – збільшуватися (крива 1, рис. 1.7).

Якщо на графіку рис. 1.7 провести вихідну вольт-амперну характеристику джерела живлення (пряма 3), то в точках перетину з вольт-амперною характеристикою світлодіодних ДС отримаємо робочі точки. Якщо на виході джерела живлення виникнуть пульсації напруги з амплітудою $dU1$, то графічним способом можна визначити пульсації струму $dI1$ (крива 2, рис. 1.7).

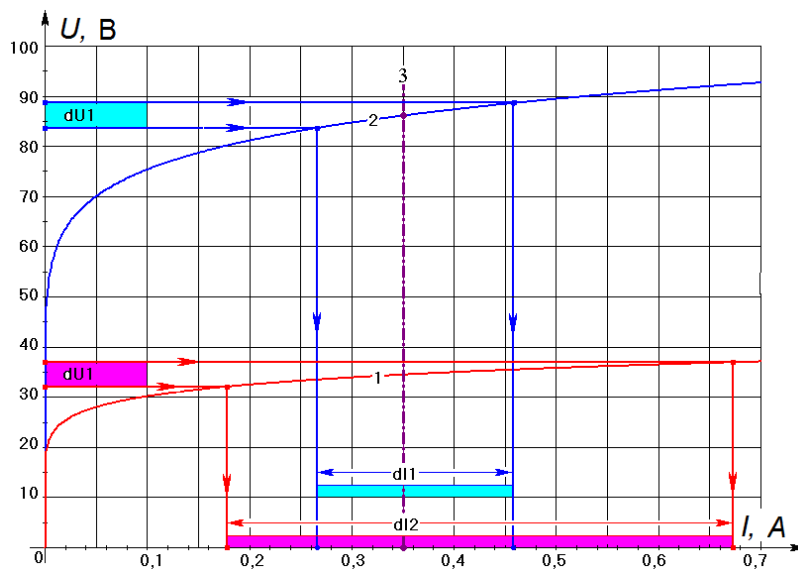


Рис. 1.7. Взаємозв'язок між пульсаціями напруги і струму напівпровідникових джерел світла з різною крутизною робочих ділянок вольт-амперних характеристик

Якщо ж опір в робочій точці буде менше (при зменшенні кількості послідовно з'єднаних світлодіодів або зміні їх типу), тоді на теж саме збурення $dU1$ реакція струму буде більш суттєвою – $dI2$ (крива 1, рис. 1.7). Тому при живленні світлодіодів, розрахованих для роботи в колі змінного струму (типу

Acriche), або пульсаціях напруги живлення це призведе до зростання пульсацій світлового потоку. Таким чином, чим вищий диференціальний опір навантаження, тим менші пульсації світлового потоку.

Необхідно згадати й про негативний вплив на показник коефіцієнта пульсації ДС регуляторів потужності або яскравості. Відомо, що найчастіше в якості регуляторів використовуються тиристорні димери, які призводять до значного зростання коефіцієнта пульсацій світлового потоку ДС. Це обумовлюється їх принципом дії, який полягає у тому, що синусоїдальна напруга мережі живлення поступає на ДС не безперервно, а частинами. Тому, чим вища встановлена яскравість лампи тим, більша частина півперіоду синусоїдальної напруги

мережі живлення на неї подається і, відповідно, чим нижча встановлена яскравість ДС, тим менша частина півперіоду синусоїдальної напруги мережі живлення подається на лампу. Так, наприклад при зменшенні потужності ЛР 60 Вт на 50 %, $k_{\text{пф}}$ ДС зростає з 11 % до 15 %, а для ЛЛ 9 Вт – з 4,7 % до 43,2 % [53].

У зв'язку з тим, що для економії електроенергії в освітлювальних установках різного призначення все більш популярними стають автоматизовані системи регулювання (димерування) світлового потоку, необхідні дані не тільки щодо динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів обраних ДС в процесі димерування, але й коефіцієнту пульсацій світлового потоку.

1.4. Аналіз сучасних способів регулювання світлового потоку джерел світла з точки зору енергоефективності

Питаннями автоматичного регулювання штучного освітлення з врахуванням зміни природної освітленості вже тривалий час займаються як у нас в країні, так і за рубежом. В розвинутих країнах світу в результаті енергетичної кризи 70-х років минулого століття автоматичне регулювання впроваджувалося всюди, дуже часто без достатніх теоретичних обґрунтувань. Відсутність теоретичних знань в цій області та неправильний підхід до проектування таких систем не давав можливості отримати очікуваний економічний ефект. Це призвело до необґрунтованого розчарування в доцільності застосування подібного роду систем. Сучасний кризовий стан світової економіки і відчутні успіхи в цій області знову привернули увагу розробників до цього питання [76-82].

Крім економії електроенергії система управління освітленням повинна відповідати наступним вимогам: а) забезпечувати розумну окупність капіталовкладень; б) відповідати світлотехнічним та електротехнічним стандартам. Умови освітлення прийнятні при відношенні яскравості в робочій зоні до яскравості оточення, рівному 3:1. При цьому середня яскравість фону – решти частини приміщення – повинна становити близько половини яскравості оточення

[83]; в) бути надійною; г) не турбувати оточуючих [84]. Регулювання освітлення може бути плавним [85] або ступінчатим [86, 87, 88]. Обидва способи відіграють важливу роль, але не в повній мірі забезпечують виконання п'яти вище перерахованих вимог.

Ступінчате регулювання світлового потоку ґрунтується на: а) *відключенні* 2/3, 1/2 або 1/3 світильників зовнішнього освітлення в години найменшої активності міського життя в нічний час або рядів світильників, розташованих в приміщеннях паралельно вікнам у відповідності зі зміною інтенсивності природного освітлення протягом дня [84]; б) *застосуванні* у кожному світильнику двох режимних баластних дроселів з відводами, які в певні періоди часу перемикають реле, змінюючи їх повний опір; в) *автономному* управлінні світильниками вмонтованими в них таймерами [87, 96]; г) *встановленні* в шафі пункту включення зовнішнього освітлення автотрансформатора з певною кількістю обмоток, які перемикаються симісторами за певним алгоритмом. Такий підхід знайшов широке розповсюдження в Європі.

Плавне регулювання світлового потоку ґрунтується на: а) *застосуванні* схем з симісторними регуляторами, які здійснюють фазове регулювання напруги живлення зміною її форми; б) *застосуванні* електронних пускорегулювальних апаратів, керованих вмонтованими таймерами або інтерфейсами DALI, DSI, 1-10 В за допомогою фотодатчиків рівня освітленості [85, 89]; в) *застосуванні* електронних трансформаторів, які у порівнянні з електромагнітними характеризуються більшою економічною ефективністю, малими розмірами і вагою; г) *зміні* форми напруги живлення – було розроблено спеціально для розрядних ламп високого тиску й успішно використовується в теперішній час більше ніж у 20 країнах Європи, Азії, Африки та Австралії. Потужність ламп можна регулювати тільки в колах з електромагнітними баластними дроселями в межах від 100 % до 20 %. При цьому компенсація реактивної потужності може бути здійснена зі сторони мережі живлення, де знаходиться регулятор потужності; д) *стабілізації* напруги живлення [84]; е) *обмеженні* потужності, яка споживається освітленням при роботі в режимі перевищення напруги [89, 90].

Перші дві системи мають індивідуальні для кожної лампи світлорегулятори, решта – це системи групового світлорегулювання.

Плавне регулювання світлового потоку дає можливість компенсувати падіння світлового потоку в процесі старіння ламп при експлуатації, відмовившись від введення 30 % запасу потужності при проектуванні освітлювальних установок, а також керувати роботою світильників у відповідності з рівнем природного освітлення під час прибирання приміщень та при частковій або повній відсутності людей [91]. Очевидно, що найбільш ефективним способом економії електроенергії є повна відмова від її використання, але в більшості випадків повністю вимикати світло не допускається [92]. Це можна здійснювати лише в замкнених просторах з тимчасовим перебуванням людей (коридори, сходинокві клітки, туалети тощо) за принципом «виходячи з приміщення, гасить світло» за допомогою датчиків присутності [7, 93-95].

Вибираючи спосіб управління освітленням і саму систему, слід враховувати властивості використаних в ОУ джерел світла. Якщо їх властивості і характеристики не дозволяють ефективно використати можливості та функції вибраної систем, їх необхідно замінити. Наприклад, ЛР і світловипромінюючі діоди придатні для будь-яких алгоритмів керування, а РЛВТ мають велику світловіддачу і споживають мало енергії, але їх не можна використовувати в системах з датчиками присутності, тому що повторне запалювання і розгорання теплої лампи триває кілька хвилин і призводить до скорочення СТС. ЛЛ в режимі частих ввімкнень, якщо не вжити спеціальних заходів, також скоріше виходять з ладу [96, 97].

Побутує стійка думка, що якщо зменшити яскравість будь-якого електричного ДС, то автоматично вирішиться проблема з економією спожитої електроенергії, а, відповідно, і всі автоматичні системи управління перейдуть в розряд енергозберігаючих. Проте це не зовсім так. І хоча величина активної потужності споживання зменшується зі зменшенням яскравості нелінійно існує ще цілий ряд прихованих параметрів, які можуть критично вплинути на всі зу-

силля створити енергозберігаючу систему, якщо при проектуванні вибрано не оптимальний спосіб регулювання ДС [99].

В теперішній час найбільш розповсюдженими є симісторні регулятори світлового потоку ДС. Їх популярність визначається не лише відносно низькою ціною, але і простотою підключення (рис. 1.8) [95].

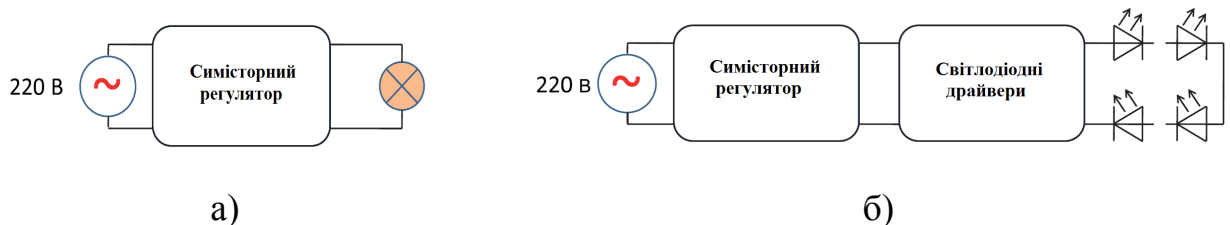


Рис. 1.8. Блок схеми регуляторів світлового потоку ДС: а – симісторний; б – спеціалізований світлодіодний драйвер, здатний змінювати значення вихідного струму під дією симісторного диммеру [100]

Крім того, існують інші способи управління НДС які вважаються найбільш перспективними і енергоефективними. На рис. 1.9,а представлена схема підключення спеціалізованого світлодіодного джерела струму, який має у своєму складі додатковий вхід управління постійною напругою 0-10 В [101, 102]. Така схема при всій своїй простоті має ряд суттєвих особливостей. Однією з них є неможливість зменшення струму через світлодіоди нижче визначеного порогу (частіше за все 10 % – 20 %). Це обумовлено схемо-технічними особливостями драйверу.

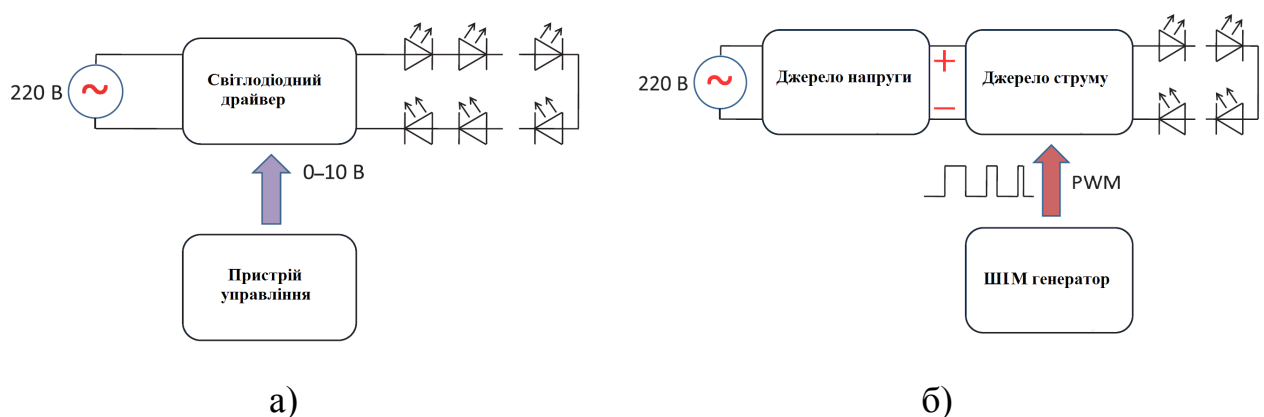


Рис. 1.9. Світлодіодні драйвери-диммери, керовані: а – напругою (інтенсивністю зовнішнього освітлення) [94]; б – зовнішнім широтно-імпульсно модульованим сигналом [103, 104]

Більш повне від 0 % до 100 % і синхронне управління яскравістю світлодіодних світильників можна отримати при використанні інтегрального імпуль-

сного драйверу із зовнішнім сигналом з широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ). Структурна схема такої системи управління представлена на рис. 1.9,б. Даний спосіб широко застосовується в багатоканальних повно колірних (RGB) системах архітектурного освітлення. Це пояснюється високим ступенем стабільності і повторюваності параметрів.

1.5. Визначення енергоефективності джерел світла

Тема енергозабезпеченості та енергоефективності стала на стільки визначальною, що не можна не погодитися зі знаменитим письменником А. Кларком, який зазначив, що єдиною світовою валютою буде (кВт×год) [105]. У підтвердження його слів, дещо видозмінено та все ж очевидно, дійсно енергетичні затрати на виробництво і використання однієї Млм×год світлової енергії в значній мірі визначають світлотехнічний рівень галузі і країни в цілому. Сьогодні є спроби характеризувати ступінь розвитку держав і «світлозабезпеченістю» при мінімізації енергоспоживання, тобто параметрами Млм×год/(люд.×рік); кВт×год / Млм×год); Млм×год / м² [7, 105-107].

Концепція енергоефективного освітлення передбачає забезпечення: а) *нормативної* освітленості в потрібному місці в потрібний час, коли в освітлювальному просторі знаходяться люди, за рахунок оптимізації розміщення світильників, підбору кольору і контрасту; б) *якісних* нормативних показників (відсутність відбитої блискості та пульсацій світлового потоку вище допустимого рівня); в) *екологічних* вимог [108, 109].

Відомо і те, що на створення 1 кВт нових генеруючих потужностей витрачається від 1 000 до 3 000 доларів США, а на економію 1 кВт потужності в системах освітлення достатньо 200-250 доларів США [106]. Зрозуміло, що економити вигідніше, тому у світі постійно розробляються та удосконалюються програми енергоощадності в ОУ, які в основному спрямовані на заміну існуючих низько ефективних ДС на більш енергоефективні та витіснення електромагнітних пускорегулювальних апаратів електронними.

В аналітичних оглядах наукової літератури світу за останні роки викристалізувалась певна динаміка зміни основних показників щодо визначення енергоефективності ДС та ОУ.

Найбільш відомим та вживаним показником енергоефективності була і поки що залишається світлова віддача (лм/Вт) [110]. Її значення знаходяться в межах від 0,04 лм/Вт для свічки до 177 лм/Вт для розрядних ламп низького тиску типу ДНаТ (рис. 1.10). Вона реально відображає енергоефективність лише теплових джерел світла, світлодіодних лампи прямої заміни (СДЛПЗ) і КЛЛ. У розрядних джерел світла вона нижче тих значень, які наведено на рис. 1.10. Це обумовлено

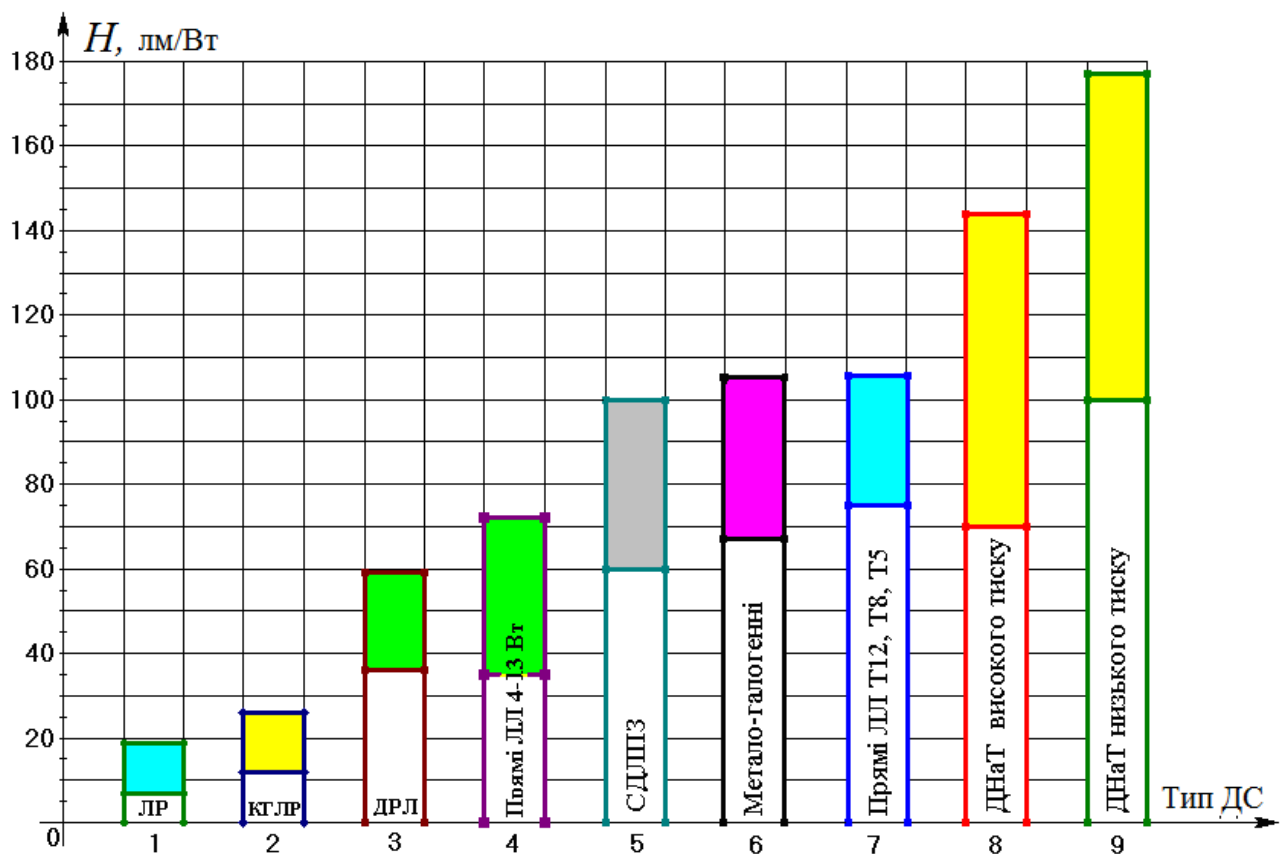


Рис. 1.10. Динаміка світлової віддачі в процесі створення нових джерел світла

тим, що для забезпечення їхньої роботи необхідна пускорегулювальна апаратура (драйвери), в яких виникають додаткові втрати потужності. Саме цей факт і призвів до введення ще одного параметра енергоефективності, який було зафіксовано в 1995 р. у федеральному стандарті США Ashrae / IEC 90. 1-90 R – це витрати електроенергії в розрахунку на один м^2 освітлювального простору (критерій максимально допустимої встановленої потужності, $\text{Вт}/\text{м}^2$). При модернізації освітлювальних

установок в якості критерію енергоефективності приймають співвідношення понесених затрат до зекономленої електроенергії [грн/(кВт×год)].

Для визначення реального потенціалу енергозбереження в державі і найбільш вірогідних перспектив розвитку світлотехнічного ринку в [111] запропоновано одночасно оцінювати кількість споживаної електроенергії різними типами джерел світла і кількість світлової енергії, яку вони генерують за певний проміжок часу (за останній рік). Сумарну кількість електроенергії, спожитої кожною групою ламп за рік, пропонується визначати за наступною формулою

$$W_{\Sigma} = N_{\text{ср}} \cdot P_{\text{ср}} \cdot \tau_{\text{р}}, \text{ кВт} \times \text{год}, \quad (1.4)$$

де $N_{\text{ср}}$ – середньорічна ємність ринку даної групи ДС, шт;

$P_{\text{ср}}$ – середня потужність типопредставника групи ДС, кВт;

$\tau_{\text{р}}$ – тривалість експлуатації типопредставника групи ДС за рік, год.

Сумарну світлову енергію, генеровану всіма ДС для кожної групи ламп

$$Q_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot H_{\text{ср}} \cdot \tau_{\text{р}}, \text{ Млм} \times \text{год}, \quad (1.5)$$

де $H_{\text{ср}}$ – усереднена світлова віддача типопредставника групи ламп, лм/Вт.

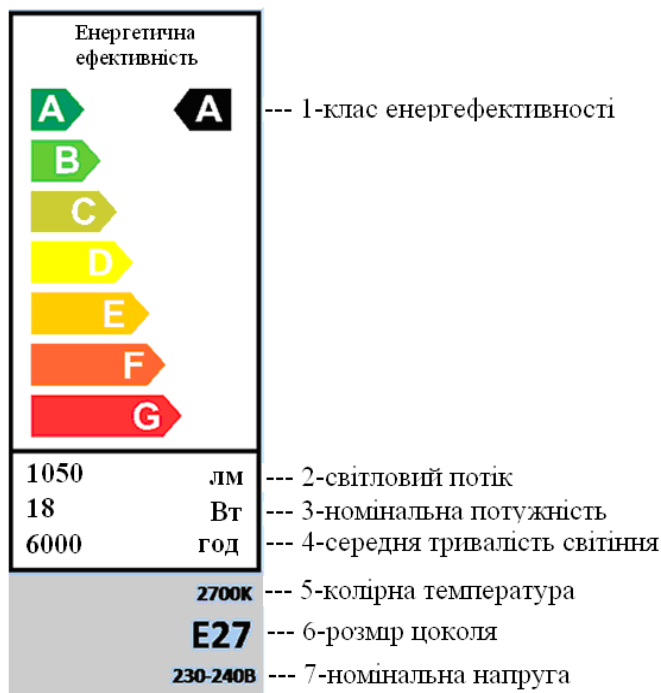


Рис. 1.11. Характеристика джерел світла згідно класів енергоефективності

Розрахунки, проведені за зазначеними формулами показали, що в Росії 28 % ТДС генерують лише 7 % світлової енергії. Це свідчить про те, що саме ця група ДС в найближчій перспективі буде представляти основні потенціальні можливості для енергозбереження за рахунок впровадження КЛЛ, ЛЛ і РЛВТ, вклад яких в генерування світлового потоку є найбільшим – 93 %. Конкуренція з боку НДС для зазначеної

групи ДС поки ще не очевидна тому, що навіть за світловими віддачами вони їй поступаються (рис. 1.10).

Найбільш популярною в даний час є оцінка ДС за класами енергоефективності [112] (рис. 1.11). Згідно з директивами комісії Євросоюзу по енергетиці і транспорту ЕС (92/75/CEE, 94/2/CE, 95/12/CE, 96/89/CE, 2003/66/CE), на упаковках джерела світла наноситься етикетка енергоефективності ЄС DIRECTIVE 2009/125/EC, на якій доступно вказуються основні споживчі властивості товару.

Ефективність використання енергії визначається класами від А до G. Клас А має найменше енергоспоживання, а клас G – найбільше. Етикетка дає також іншу корисну інформацію про властивості товару. Так, на етикетку ДС крім класу енергоефективності наносять значення світлового потоку, номінальної потужності, СТС, колірної температури, розміру цоколя та номінальної напруги.

ДС відносять до класу енергоефективності А якщо:

– для ЛЛ без вмонтованого ПРА, який потрібен для ввімкнення їх в мережу

$$P \leq 0,15 \cdot \sqrt{F} + 0,0097 \cdot F, \quad (1.6)$$

– для інших ДС (ЛР і КЛЛ)

$$P \leq 0,24 \cdot \sqrt{F} + 0,0103 \cdot F, \quad (1.7)$$

де F , P – світловий потік і споживана потужність ДС відповідно, лм і Вт.

Якщо ДС не відноситься до класу А, тоді спочатку розраховують стандартну потужність P_R за формулами (1.8), (1.9)

$$P_R \leq 0,88 \cdot \sqrt{F} + 0,049 \cdot F, \text{ для } 34 \text{ лм} < F \leq 6500 \text{ лм}, \quad (1.8)$$

$$P_R = 0,2 \cdot F, \text{ для } F \leq 34 \text{ лм}. \quad (1.9)$$

Після цього розраховується індекс енергоефективності $E_I = P / P_R \cdot 100 \%$, за величиною якого з табл. 1.1 визначається клас енергоефективності за шкалою від В (низьке споживання електроенергії) до G (високе споживання електроенергії). Таким чином вважається, що споживана потужність – це визначальний показник енергоефективності. Чим він менший, тим краще [113,114].

З появою НДС на противагу зазначеним параметрам з'явилися спроби оцінки енергоефективності ДС за вартістю одиниці світлового потоку, як частку

Таблиця 1.1
Розподіл класів енергоефективності ДС

Клас енерго- ефективності	Індекс енергоефекти- вності E_I
B	$E_I < 60 \%$
C	$60 \% \leq E_I < 80 \%$
D	$80 \% \leq E_I < 95 \%$
E	$95 \% \leq E_I < 110 \%$
F	$110 \% \leq E_I < 130 \%$
G	$E_I \geq 130 \%$

від ділення вартості ДС на його номінальний світловий потік (1.10), так і кількістю люмен на гривню [115]. При цьому вартість пускорегулювального апарата (драйвера), без якого не можуть працювати світлодіоди, і втрати потужності в ньому чомусь не враховуються [116]

$$E_{\text{дс}} = C_{\text{дс}} / F_{\text{ном.}}, \text{ грн/лм} \quad \text{або} \quad E_{\text{дс}} = F_{\text{ном.}} / C_{\text{дс}}, \text{ лм/грн.} \quad (1.10)$$

Айзенберг Ю.Б. пропонує оцінювати енергоефективність ДС як відношення виробленої за СТС світлової енергії до потужності ДС (1.11) [8]

$$E_{\text{дс}} = F_{\text{ном.}} \cdot \tau / P_{\text{дс}}, \text{ Млм} \times \text{год} / \text{Вт.} \quad (1.11)$$

Скобелев В.М. запропонував визначати енергоефективність освітлювальних установок за відношенням суми повної її вартості та експлуатаційних витрат до добутку сумарного світлового потоку ОУ на СТС ДС (1.12) [117]

$$E_{\text{оу}} = C_{\Sigma} / (F_{\Sigma\text{оу}} \cdot \tau), \text{ грн}/(\text{Млм} \times \text{год}), \quad (1.12)$$

де $E_{\text{дс}}$, $E_{\text{оу}}$ – енергоефективність ДС та ОУ відповідно;

$C_{\text{дс}}$, C_{Σ} – вартість ДС та ОУ відповідно, грн;

$F_{\text{ном.}}$, $F_{\Sigma\text{оу}}$, – номінальний і сумарний світловий потік ДС і ОУ, лм;

τ , $P_{\text{дс}}$ – СТС і потужність ДС відповідно, год, Вт.

Рохлин Г.Н. вважає, що найкращим показником енергоефективності ДС є світловіддача, а ОУ – найменша вартість експлуатаційних витрат в розрахунку на одиницю виробленої за СТС світлової енергії (лм \times год) [50].

Степура В.І. в [118] зазначає, що показник питомої встановленої потужності для оцінки енергоефективності вуличного освітлення у нормативних до-

кументах не знайшов свого відображення. Тому він запропонував ще два показники, які можуть бути кандидатами у критерії енергоефективності ОУ вуличного освітлення, а саме:

а) – витрати потужності на один люкс створюваної освітленості, що визначається з виразу

$$\Delta P_E = P_{\Sigma \text{св}} / E_{\text{ср}}, \text{ Вт/лк}, \quad (1.13)$$

де ΔP_E – витрати потужності на один люкс створюваної освітленості, Вт/лк;

$P_{\Sigma \text{св}}$ – сумарна потужність світильників ОУ, Вт;

$E_{\text{ср}}$ – середня освітленість, створювана ОУ, лк;

б) – витрати потужності на один люмен корисного світлового потоку, що визначається з виразу

$$\Delta P_F = P_{\Sigma} / (E_{\text{ср}} \cdot S) = P_{\Sigma} / F_{ES}, \text{ Вт/(лк} \times \text{м}^2), \quad (1.14)$$

де ΔP_F – витрати потужності на один люмен корисного світлового потоку $\text{Вт/(лк} \times \text{м}^2) = \text{Вт/лм}$;

F_{ES} – корисний світловий потік, тобто та частина світлового потоку світлових приладів, що створює освітленість E на поверхні S , лм.

Цей показник є оберненим до світловіддачі, яка застосовується для оцінки енергоефективності окремих ДС і світлових приладів. У зв'язку з тим, що для ОУ такого поняття не існує, автор і обґрунтовує необхідність його введення. У висновках автор схиляється до думки, що критерій максимальної встановленої потужності може бути основним, а максимально допустимі втрати потужності на один люмен корисного світлового потоку, які характеризують ефективність використання світлорозподілу світлових приладів в ОУ, і максимально допустимі витрати потужності на один люкс створюваної освітленості, що характеризують оптимальність розміщення світлових приладів у просторі, як додаткові.

Проте, цей розрахунок важко використати у визначенні енергоефективності ДС, адже він дуже односторонній (в основному використовуються тільки

світлотехнічні показники) і не враховує багато факторів (експлуатаційних та економічних), а головне фінансових витрат, які є основоположними при визначенні енергоефективності.

Натомість, у працях [90, 119] чітко зазначено важливість цінового фактору при застосуванні методики техніко-економічного порівняння рівноцінних ОУ. Виявлення найбільш економічного варіанту проводиться по мінімуму приведених затрат (1.15), коли не враховуються витрати на електротехнічну частину (монтаж та експлуатацію освітлювальних мереж, магістральних та групових щитків та іншого електрообладнання), тому що ці витрати для порівнювальних варіантів вважаються приблизно однаковими

$$C_{\text{пр}} = N \left[T \cdot \frac{A + a}{\tau} \cdot n + \frac{\chi \cdot \tau_{\text{oy}} \cdot P \cdot q \cdot n + 150 \cdot A \cdot n + 250 \cdot (Б + М) + 1000 \cdot n_{\text{ч}} \cdot В}{1000} \right], \quad (1.15)$$

де $C_{\text{пр}}$ – приведені затрати, грн;

N – загальна кількість освітлювальних приладів одного типу в ОУ, шт;

n – кількість джерел світла в одному освітлювальному приладі, шт;

P, τ – потужність і СТС одного джерела світла відповідно, Вт, год;

T – число годин використання освітлювального навантаження в рік;

q – тариф на електричну енергію, грн/(кВт×год);

$n_{\text{ч}}$ – кількість чисток освітлювальних приладів протягом року, шт;

$A, Б$ – ціна одного ДС та одного освітлювального приладу відповідно, грн;

$М$ – вартість монтажу одного освітлювального приладу, грн;

$С$ – вартість монтажу електротехнічної частини освітлювальної установки на 1 кВт встановленої потужності джерел світла і втрат в ПРА, грн/кВт;

a – вартість робіт по заміні одного джерела світла, грн;

$В$ – вартість однієї чистки одного освітлювального приладу, грн;

χ – коефіцієнт для врахування втрат потужності в мережах і ПРА.

Вайер Б.Г. та Зонневельд Л. пропонують визначати енергоефективність ОУ відношенням загального експлуатаційного світлового потоку до її середньої потужності за час її використання (1.16) [120]

$$E_{\text{ОУ}} = F_{\Sigma\text{ОУ}} / (\Sigma P_{\Sigma\text{ОУ}} \cdot k_{\text{дім}} \cdot k_{\text{зап}}), \text{ лм/Вт}, \quad (1.16)$$

де $F_{\Sigma\text{ОУ}}$ – сумарний світловий потік світильників ОУ, лм;

$P_{\Sigma\text{ОУ}}$ – сумарна встановлена потужність ОУ (ДС + втрати в ПРА), Вт;

$k_{\text{дім}}$ – коефіцієнт зниження часу використання ОУ за рахунок застосування систем управління освітленням;

$k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, який враховує спад світлового потоку в процесі експлуатації.

Кожушко Г.М. у [121] для оцінки ефективності ОУ пропонує враховувати і додаткові витрати $\Delta D_{\text{ут}}$, пов’язані з вимогами їх екологічної безпечної утилізації за виразом (1.17)

$$\Delta D_{\text{ут}} = C_{\text{ут}} \cdot T \cdot n / \tau, \quad (1.17)$$

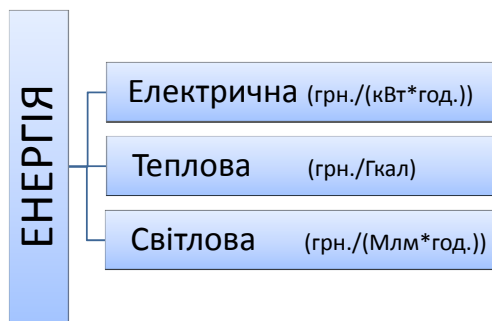
де $C_{\text{ут}}$ – вартість утилізації одного джерела світла.

Проте, у формулах (1.13, 1.14) не враховано вплив систем управління світловим потоком на середню тривалість світіння ДС, динаміку пульсацій світлового потоку, електромагнітну сумісність з мережею тощо. У виразі (1.14) відсутній грошовий показник, який є найважливішими при визначенні енергоефективності як окремо взятого ДС, так і ОУ в цілому. Енергоефективність чомусь зводиться в результаті перетворень до світлової віддачі (лм/Вт).

Ні один з вищезгаданих підходів не є системним, який би спирався не лише на номінальні електричні та світлотехнічні параметри, але й на експлуатаційні, пов’язані з витратами на закупівлю не тільки ДС та ПРА, а й оплатою рахунків за спожиту електроенергію, врахування впливу збурювальних факторів на електричні, світлотехнічні та експлуатаційні параметри тощо.

З вищевикладеного випливає, що світлову енергію, як і будь-який інший вид енергії (електричну, теплову), треба розглядати як товар, який продається і має обґрунтовано визначену ціну за певну одиницю. Свого роду тариф (рис. 1.12).

Для електричної енергії це вартість одиниці електричної енергії (грн/(кВт×год)), для теплової – одиниці теплової енергії (грн/Гкал), а для світлової за аналогією – одиниці світлової енергії (грн/(Млм×год)). Такий підхід був запропонований ще в 1955 році А.П. Івановим [122].



Пізніше питаннями вартості одиниці світлової енергії займалися І.А. Ба-ринова [123], А.В. Кримов, В.Д. Нікітін [124], який оцінку енергоефективності ДС запропонував здійснювати за вартістю одиниці світлової енергії (1.18)

Рис. 1.12. Тарифи на різні види енергії

$$E_{\text{дс}} = q \cdot H_{\text{дс}}^{-1} + C_{\text{дс}} \cdot (F_{\text{дс}} \cdot \tau)^{-1}, \text{ грн}/(\text{клм} \times \text{год}), \quad (1.18)$$

де q – тариф на електроенергію, грн/(кВт×год),

$H_{\text{дс}}$ – світлова віддача джерел світла, клм/кВт;

$F_{\text{дс}}$ – світловий потік джерел світла, клм.

Тарасенко М. Г. [125] для визначення істинних значень вартості одиниці світлової енергії запропонував враховувати наступні збурювальні фактори:

– *кількість світлової енергії*, яку може генерувати ДС за повну СТС з врахуванням закону спаду світлового потоку в процесі експлуатації в умовах, які не відхиляються від номінальних, оговорених в нормативно технічній документації;

– *вартість ДС* та мінімально необхідної для нього ПРА;

– *вартість електроенергії*, спожитої ДС за повну СТС з врахуванням втрат потужності в ПРА та інших можливих втрат, наприклад на електродах ЛЛ [126];

– *вплив частоти увімкнень* на СТС ДС;

- вплив коефіцієнта амплітуди струму лампи на світловий потік та СТС;
- вплив режиму запалювання розряду в лампі, тобто режиму попередньої температурної підготовки електродів ДС, на СТС [127];
- вплив температури оточуючого середовища на величину світлового потоку джерела світла [128];
- витрати, пов'язані з необхідністю демеркуризації ДС, в склад яких входять шкідливі речовини (ртуть) [129];
- вплив відхилень напруги мережі від номінальних значень на експлуатаційні, електричні та світлотехнічні характеристики ДС [130, 131];
- вплив типу баластного струмообмежувального опору (індуктивного, індуктивно-ємнісного, напівпровідникового) на СТС ДС;
- електромагнітну сумісність ДС з мережею живлення. Це обумовлено тим, що електромагнітно-несумісні ДС (до яких в теперішній час відносяться більшість компактних люмінесцентних ламп з електронними ПРА) призводять до виникнення помітних додаткових втрат в електромережах, до яких споживач байдужий [132, 133].

Крім того, Тарасенко М.Г. запропонував проводити розрахунок енергоефективності ДС базуючись на розрахунку вартості одиниці світлової енергії за наступними формулами

$$E_{\text{дс}} = (C_{\text{дс}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{ПРА}}) / Q, \text{ грн}/(\text{Млм} \times \text{год}), \quad (1.19)$$

$$C_{\text{ПРА}} = [C_{\text{ІЗП}} \cdot (\tau_{\text{дс}} / \tau_{\text{ІЗП}}) + C_{\text{ПРА}} \cdot (\tau_{\text{дс}} / \tau_{\text{ПРА}})], \text{ грн}, \quad (1.20)$$

де $C_{\text{дс}}, C_{\text{ІЗП}}, C_{\text{ПРА}}, C_{\text{ел}}$ – вартість ДС, імпульсного запалюючого пристрою (ІЗП) (стартеру тліючого розряду або напівпровідникового стартеру, якщо використовується електромагнітний ПРА), ПРА (баластного дроселя, якщо використовується електромагнітний ПРА або в цілому електронного ПРА) та спожитої за СТС електроенергії, грн;

$\tau_{\text{дс}}, \tau_{\text{ІЗП}}, \tau_{\text{ПРА}}$ – СТС ДС, строк служби ІЗП та ПРА відповідно, год.

Варто зазначити, що в Європі мірою енергоефективності служить показник *LENI* (*Lighting Energy Numeric Indicator*) (1.21) [134, 135], який вимірюється в

кВт×год/(м²×рік) і відображає річне споживання енергії, необхідної для функціонування систем освітлення у відповідності зі специфікаціями будівлі [136].

В стандарті [134] приведена формула для визначення річного споживання електроенергії освітлювальною установкою будівлі

$$LENI = W_{LIGHT} / S_{оп}, \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{м}^2 \times \text{рік}), \quad (1.21)$$

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

W_{LIGHT} – річне споживання електроенергії освітлювальною установкою будівлі, яке згідно з [134] визначається за наступною формулою

$$W_{LIGHT} = W_L + W_{пр}, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{рік}, \quad (1.22)$$

$$W_L = \Sigma \{ (P_{\Sigma св} \cdot k_o) \cdot [(t_d \cdot k_{пл} \cdot k_d + (t_n \cdot k_o))] \} / 1000, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{рік}, \quad (1.23)$$

$$W_{пр} = \Sigma \{ \{ P_{пр} \cdot [\tau_p - (\tau_d + \tau_{нч})] \} + (P_{зр} \cdot \tau_{зр}) \} / 1000, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{рік}, \quad (1.24)$$

$P_{\Sigma св}, P_{зр}$ – повна встановлена потужність робочих світильників та зарядних пристроїв аварійних світильників, розташованих у розглядуваній зоні відповідно;

k_o – коефіцієнт постійності освітленості;

$\tau_d, \tau_{нч}$ – тривалість роботи в денний і нічний час відповідно, год;

k_d – коефіцієнт використання природного освітлення;

$k_{пл}$ – коефіцієнт присутності людей;

$P_{пр}$ – паразитна потужність в зоні, яка зазвичай визначає втрати в режимі очікування, Вт [137];

τ_p – стандартна тривалість року, $\tau_p = 8760$ год;

$\tau_{зр}$ – тривалість зарядки акумуляторів світильників аварійного освітлення;

$W_{пр}$ – витрати енергії, обумовлені паразитною потужністю в режимі очікування і на аварійне освітлення,

Крім того, обчислюється показник якості (ергономічності) освітлення *ELI* (*Ergonomic Lighting Indicator*). Цей показник був уведений для того, щоб з од-

ного погляду можна було б оцінити багато чисельні аспекти якості освітлення [138-140]. Він поєднує в собі п'ять основних критеріїв, які дозволяють узагальнено описати якість ОУ на основі врахування найбільш важливих, з точки зору людини, задач освітлення. До цих критеріїв відносяться: а) зорова робота; б) сприйняття сцени; в) зоровий комфорт; г) життєдіяльність; д) можливості впливати на освітлення. Оцінка здійснюється за шкалою від 1 (дуже погано) до 5 (відмінно) [139, 140]. Загальний опис усіх критеріїв приведений на рис. 1.13. У третьому стовпці подано параметри, які є основою цих критеріїв. Даний метод застосовується на стадії проектування освітлення. Спочатку обговорюються вимоги до освітлення, потім розробляється проект освітлення або монтується ОУ, після чого відбувається оцінка відповідного рішення.

Критерій А - зорова робота	Освітлення у відповідності з вимогами стандартів, необхідне для ідентифікації і виконання зорових задач	<ul style="list-style-type: none"> - Освітленість - Рівномірність освітленості - Кольоропередача - Передача контрасту - Обмеження на відбивання - Обмеження на різькі тіні 	
Критерій В - сприйняття сцени	Світло використовується не тільки для зору, але й для сприйняття (наприклад, в представницьких будівлях)	<ul style="list-style-type: none"> - Архітектурне рішення - Очікування користувача - Орієнтація - Ієрархія сприйняття - Матеріал - Навколишнє середовище 	
Критерій С - зоровий комфорт	Крім можливості виконання зорових задач, світло необхідне для сприйняття об'єктів і поверхонь	<ul style="list-style-type: none"> - Контроль блискоті (UGR) - Розподіл яскравості - Моделювання - Природне освітлення - Обмеження на пульсації 	
Критерій D - життєдіяльність	Світло здійснює суттєвий вплив на самопочуття і активність людей та підтримує протікання біологічних процесів	<ul style="list-style-type: none"> - Самопочуття - Активність - Природні процеси - Біологічні процеси - Небезпеки 	
Критерій Е - можливості	Індивідуальний вплив на освітлення. Датчики та системи впливу здатні задовольнити індивідуальні запити споживача	<ul style="list-style-type: none"> - Індивідуальне управління - Місце освітлення - Автоматичне управління - Динамічне освітлення - Гнучкість 	

Рис. 1.13. П'ять узагальнених критеріїв оцінки якості освітлення та їх опис

Показник *LENI* дозволяє визначити енергоефективність ОУ й указує на необхідність ефективного управління освітленням. Дуже важливе значення має використання датчиків присутності і природного освітлення. Застосування засобів управління забезпечує кращу відповідність запитам споживачів. В результаті забезпечується зменшення енергоспоживання, тоді як якість освітлення може навіть покращуватися. Таким чином, оцінюється баланс між сприйняттям освіт-

лення людиною та енергоефективністю.

З вищевикладеного випливає, що на сьогоднішній день оцінка енергоефективності ДС здійснюється в різних країнах по різному, проте жоден із уже запропонованих підходів не є системним та науково обґрунтованим. Більшість підходів однобокі й не враховують найголовнішого фактору – грошей, які витрачаються не лише на придбання ДС або ОП, але й на оплату за спожиту електроенергію ОУ. В основному все зводиться до розгляду або суто світлотехнічних факторів, або експлуатаційних з частковим врахуванням емоційних факторів сприйняття людиною світла. Таким чином в теперішній час навіть для джерел світла загального призначення ще так і не склалася система єдиних критеріїв для порівняння їхньої енергоефективності. Тому метою наших подальших досліджень і стала розробка системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок побудованих на їх основі.

1.6. Висновки з розділу 1

1. Підкреслено, що основою ефективної енергетичної політики сучасності повинні стати: енергобезпека, енергоефективність, енергозбереження та екологічна гармонізація суспільного розвитку.

2. Незважаючи на великі досягнення в світлотехнічній галузі, глобальний за масштабами попит на штучне освітлення ще далекий до насичення. Тому треба створювати умови для більш інтенсивного впровадження високоефективних ДС.

3. Найбільш вагомими за використанням електроенергії для освітлення є житловий сектор (28 %) і сектор обслуговування (48 %), що вказує на необхідність звернення особливої уваги до них в плані підвищення енергоефективності.

4. Радикального збільшення енергоефективності ОУ можна досягнути не лише за рахунок зменшення загальної встановленої потужності шляхом переходу на високоефективні ДС, але й за рахунок зниження загального споживання енергії на основі впровадження інтелектуальних систем управління освітленням.

5. В Україні відсутня науково-обґрунтована концепція щодо енергоефективних зон та методів управління ОУ в залежності від їх призначення.

6. Відсутність публікацій та комплексних порівняльних досліджень характеристик звичайних Т12, енергоефективних Т8, тонких Т5, та супертонких Т2 ЛЛ на високих частотах уповільнює процес їх застосування в ОУ.

7. Незважаючи на поетапну заборону застосування теплових джерел світла, об'єми їх продаж практично не змінилися, що пояснюється збільшенням попиту на більш енергоефективні кварцово-галогенні лампи розжарення і реалізацію ламп розжарювання загального призначення в якості «обігрівачих кульок» з досить високим тепловим ККД – 95 %. Це свідчить про доцільність проведення науково-дослідних робіт, спрямованих на підвищення їхньої енергоефективності.

8. Існуючі способи диммерування світлового потоку ДС не враховують вплив динаміки таких важливих параметрів як електромагнітна сумісність, коефіцієнт потужності та коефіцієнт пульсації світлового потоку на енергоефективність, що часто призводить до дискредитації цього процесу як такого.

9. З появою напівпровідникових джерел світла, яким притаманні не тільки високі світлові віддачі і середня тривалість світіння, але й велика ціна, виникла необхідність у розробці (з точки зору сукупності показників), системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок побудованих на їх основі.

На основі розглянутих матеріалів визначені основні напрямки подальших досліджень:

1. Аналіз сучасного стану досліджень динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації і регулювання світлового потоку та методів оцінки енергоефективності освітлювальних установок, побудованих на їх основі.

2. Встановлення математичних залежностей номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для існуючих типів джерел світла з метою здійснення прогнозової оцінки граничних значень їхніх світлових віддач.

3. Розробка методики для визначення реалістичних значень можливих змін номінальних світлових віддач (зростання або падіння) зі зростанням номінальних потужностей джерела світла.

4. Дослідження впливу геометричних параметрів люмінесцентних ламп (діаметра і довжини) на їх електричні і світлотехнічні характеристики при поступовій зміні частоти напруги живлення.

5. Розробка системного підходу до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їх вибору при реалізації проектів освітлення в усіх сферах людської діяльності (комерційній, побутовій, промисловій тощо), спираючись на задекларовані виробником номінальні параметри (потужність, світлову віддачу та середню тривалість світіння) в залежності від режимів експлуатації, цін на світлотехнічну продукцію та діючих тарифів на електроенергію.

6. Дослідження енергоефективності регулювання світлового потоку джерел світла та освітлювальних установок з точки зору системного підходу з урахуванням дії основних збурювальних факторів з метою встановлення діапазонів напруг (струмів), в яких регулювання світлового потоку є найбільш вигідним.

7. Побудова математичних моделей електричних та світлотехнічних параметрів напівпровідникових джерел світла, придатних для визначення їхньої енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

8. Дослідження динаміки електричних, світлотехнічних та експлуатаційних параметрів джерел світла в процесі експлуатації та від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим.

9. Створення методики визначення оптимального номінального значення струму, розроблених світлодіодних світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння.

10. Розробка концепції конструювання безблискісних світлодіодних світильників.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ, СПЕКТРАЛЬНИХ, СВІЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Сучасні проблеми енергоефективного освітлення багатогранні. Їхнім вирішенням займається велика кількість передових компаній та організацій, що працюють в галузі світлотехніки. З метою розширення існуючого асортименту світлотехнічної продукції вони закладають в основу новітніх розробок найактуальнішу на сьогоднішній день тенденцію: збільшення енергоефективності освітлювальних установок. В результаті на світовому ринку постійно з'являються інноваційні джерел світла, світлові прилади та системи керування світловим потоком освітлювальних систем як для внутрішнього, так і для зовнішнього освітлення. Одним із основних параметрів, який визначає енергоефективність освітлювальних установок, є світлова віддача джерел світла. Вона залежить від фізичних принципів їхньої роботи (теплові, розрядні чи напівпровідникові), потужності, напруги мережі (низьковольтні чи високовольтні), режимів експлуатації та температури оточуючого середовища. Остання критична виключно для люмінесцентних ламп та натрієвих ламп низького тиску. Теплові і розрядні лампи високого тиску до коливань температури навколишнього середовища не чутливі. В той час як напівпровідникові ДС (світлодіоди) особливо чутливі не лише до температури на $p-n$ переході кристала, але й до підвищення температури оточуючого їх середовища в світильнику.

2.1. Залежність номінальних світлових віддач джерел світла від номінальних потужностей

Аналіз останніх досліджень та публікацій [50, 110, 117, 141] показав, що в них досить детально викладено матеріал щодо фізичних принципів дії, розрахунку та конструювання вище згаданих джерел світла і відверто слабо пред-

ставлені дослідження щодо встановлення математичних залежностей номінальних світлових віддач від номінальних потужностей. Наявність таких досліджень дасть можливість здійснювати прогностичні оцінки граничних значень світлових віддач не тільки існуючих, але й перспективних джерел світла, та визначатися з такою номенклатурою їхніх потужностей, яка б дозволяла реалізовувати принцип дискретного, а не плавного регулювання світлового потоку освітлювальних установок за рахунок вимикання певної кількості ламп у наперед визначені години доби [142, 143].

Дослідження проводилася на основі аналізу каталожних даних передових світлотехнічних фірм PHILIPS та OSRAM [144, 145]. Це дало можливість встановити функціональні залежності номінальних світлових віддач ДС від їхніх номінальних потужностей, які наведено в табл. 2.1-2.6. За даними цих таблиць побудовано відповідні графічні залежності (рис. 2.1-2.6).

Аналіз рис. 2.1-2.6 свідчить про те, що номінальні світлові віддачі ДС незалежно від фізичних принципів їхньої дії з ростом номінальної потужності змінюються за одним і тим самим законом – гіперболічним. Для більшості ДС (див. рис. 2.1-2.5) це зростаючі гіперболи. І тільки для трьох типів ДС (трубчастих ЛР, безелектродних ЛЛ ENDURA та метало-галогенних ламп з керамічними пальниками рис. 2.6) вони є падаючими.

Для всіх функціональних залежностей характерні наступні три ділянки: 1 – швидкого зростання (падіння) світлової віддачі (ділянки подібні $k-t$ на рис. 2.7); 2 – уповільненого – (ділянки подібні $t-m$); 3 – переходу до насичення (ділянки подібні $m-\infty$). Чим менш вагомою є друга ділянка $t-m$ (тобто чим ближче кут між дотичними d та e на рис. 2.7 до 90°), тим менш вірогідна перспектива підвищення ефективності не тільки малопотужних, але й високо потужних ДС. Так серед ТДС (рис. 2.1) найбільші перспективи щодо підвищення ефективності потужних ламп мають ЛР SPECIAL A (крива 1), КГЛР класів А ЕКО (2), HALOLUX CERAM ЕКО (6) та HALOLINE ЕКО (5). Найменші – КГЛР класів Р ЕКО (2) та низьковольтні капсульні HALOSTAR ЕКО (6).

Таблиця 2.1

Функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для теплових джерел світла (рис. 2.1)

№ графіка на рис. 2.1	Типи теплових джерела світла	Аналітичний вираз
1	ЛР SPECIAL A, з термозахистом	$H_{\text{л.ном.}} = -251,47 / P_{\text{л.ном.}} + 16,90$
2	КГЛР класу Р ЕКО	$H_{\text{л.ном.}} = -151,95 / P_{\text{л.ном.}} + 17,20$
3	КГЛР класу А ЕКО	$H_{\text{л.ном.}} = -189,82 / P_{\text{л.ном.}} + 19,63$
4	КГЛР HALOLUX CERAM ЕКО	$H_{\text{л.ном.}} = -270,58 / P_{\text{л.ном.}} + 21,09$
5	HALOLINE ЕКО КГ ЛР лінійна на 230 В	$H_{\text{л.ном.}} = -300,94 / P_{\text{л.ном.}} + 22,61$
6	КГЛР HALOSTAR ЕКО (капс. на 12 В)	$H_{\text{л.ном.}} = -83,33 / P_{\text{л.ном.}} + 26,90$

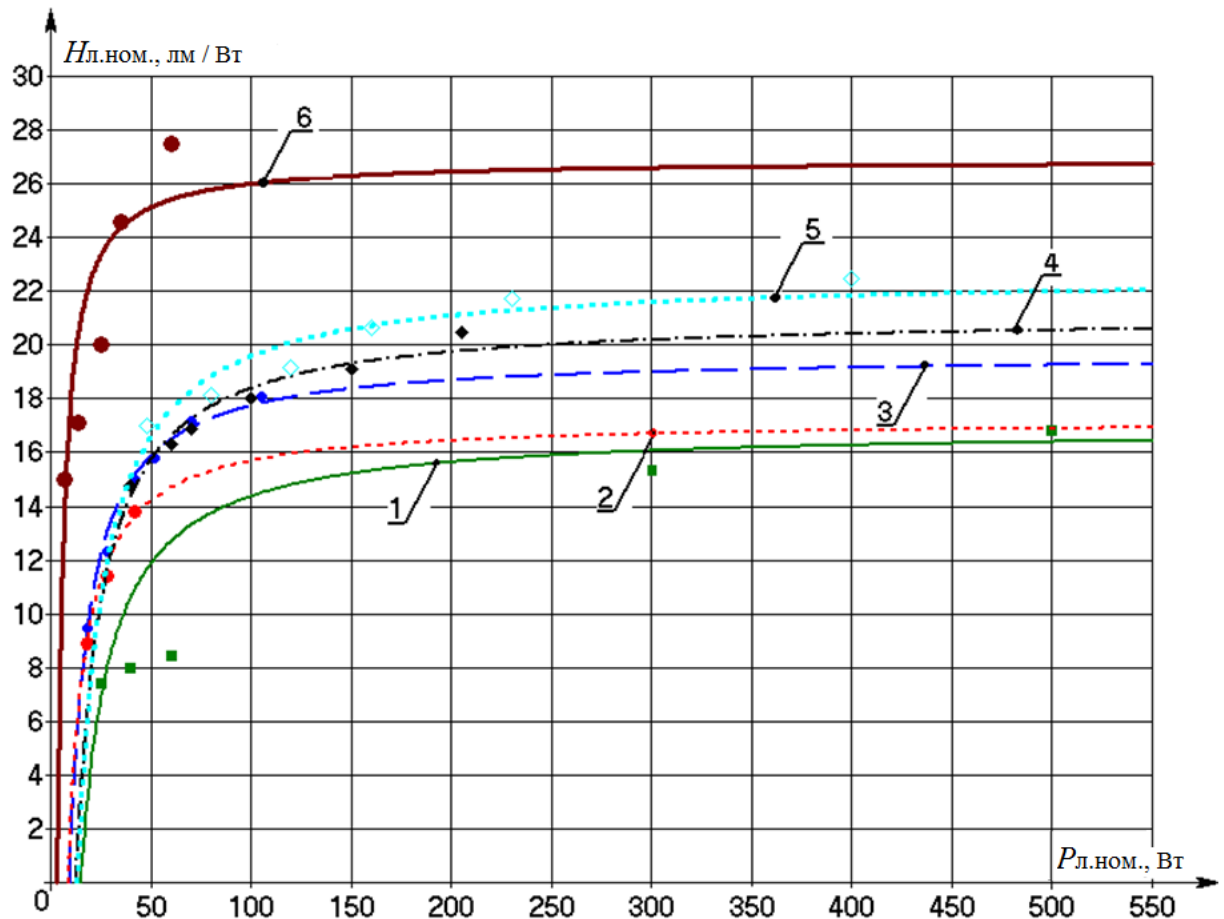


Рис. 2.1. Залежність номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для теплових джерел світла (ТДС): 1 – лампи розжарення SPECIAL A, з термозахистом; 2 – КГЛР класу Р ЕКО (заміна ЛР); 3 – КГЛР класу А ЕКО (заміна ЛР); 4 – КГЛР HALOLUX CERAM ЕКО (заміна ЛР, циліндр. колба); 5 – HALOLINE ЕКО КГ ЛР лінійна на 230 В; 6 – КГЛР HALOSTAR ЕКО (капсульна на 12 В)

Таблиця 2.2

Функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для розрядних ламп високого тиску (рис. 2.2)

№ графіка на рис. 2.2	Типи розрядних ламп високого тиску	Аналітичний вираз
1	Ртутні лампи HQL (STANDART) (ДРЛ)	$H_{\text{л.ном.}} = -1031,02 / P_{\text{л.ном.}} + 57,99$
2	Метало-галогенні лампи з кварцовим пальником POWERSTAR HQI-TS	$H_{\text{л.ном.}} = -20000 / P_{\text{л.ном.}} + 110$
3	Метало-галогенні лампи з кварцовим пальником POWERSTAR HQI-E,	$H_{\text{л.ном.}} = -8000 / P_{\text{л.ном.}} + 113,67$
4	Натрієві лампи високого тиску VIALOX NAV-E SUPER 4Y	$H_{\text{л.ном.}} = -3376,38 / P_{\text{л.ном.}} + 139,73$
5	Натрієві лампи низького тиску SOX	$H_{\text{л.ном.}} = -1412,83 / P_{\text{л.ном.}} + 175,3$

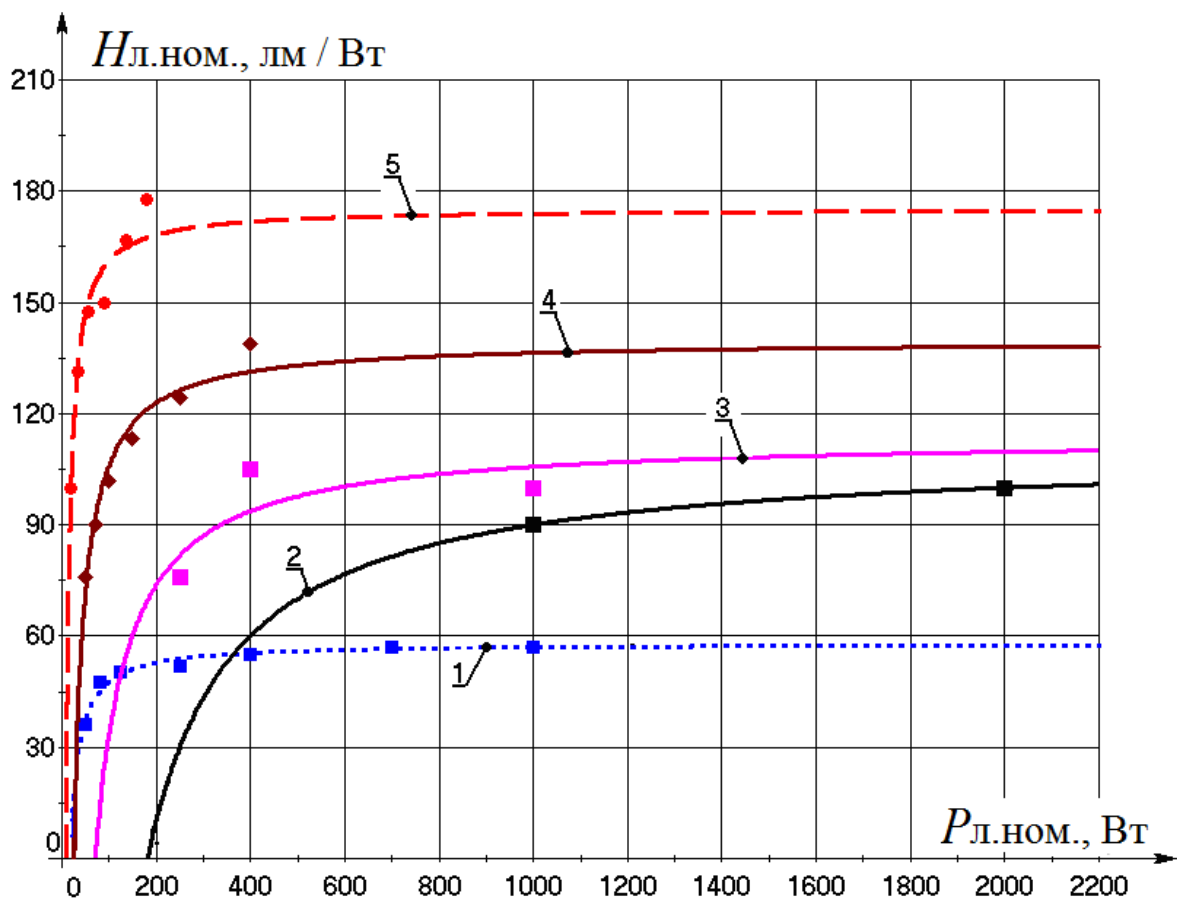


Рис. 2.2. Залежність номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для РЛБТ: 1 – ртутні лампи HQL (STANDART) (ДРЛ); 2 – метало-галогенні лампи з кварцовим пальником POWERSTAR HQI-TS без зовнішньої колби для закритих світильників; 3 – метало-галогенні лампи з кварцовим пальником POWERSTAR HQI-E, прозорі з покриттям; 4 – натрієві лампи високого тиску VIALOX NAV-E SUPER 4Y (230 В, еліптична колба); 5 – натрієві лампи низького тиску SOX (для контрастного освітлення в тумані)

Таблиця 2.3

Функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для люмінесцентних ламп (рис. 2.3)

№ графіка на рис. 2.3	Типи люмінесцентних ламп	Аналітичний вираз
1	Трубчасті SA T12	$H_{\text{л.ном.}} = -398,93 / P_{\text{л.ном.}} + 79,95$
2	Трубчасті LUMILUX T2 FM	$H_{\text{л.ном.}} = -170,01 / P_{\text{л.ном.}} + 85,08$
3	Трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HO CONST.	$H_{\text{л.ном.}} = -274,08 / P_{\text{л.ном.}} + 92,31$
4	Трубчасті ЛЛ LUMILUX T8	$H_{\text{л.ном.}} = -337,09 / P_{\text{л.ном.}} + 95,28$
5	Трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HO	$H_{\text{л.ном.}} = -284,87 / P_{\text{л.ном.}} + 97,38$
6	Трубчасті ЛЛ LUMILUX X XT T8	$H_{\text{л.ном.}} = -427,99 / P_{\text{л.ном.}} + 99,82$
7	Трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HE	$H_{\text{л.ном.}} = -191,56 / P_{\text{л.ном.}} + 109,85$

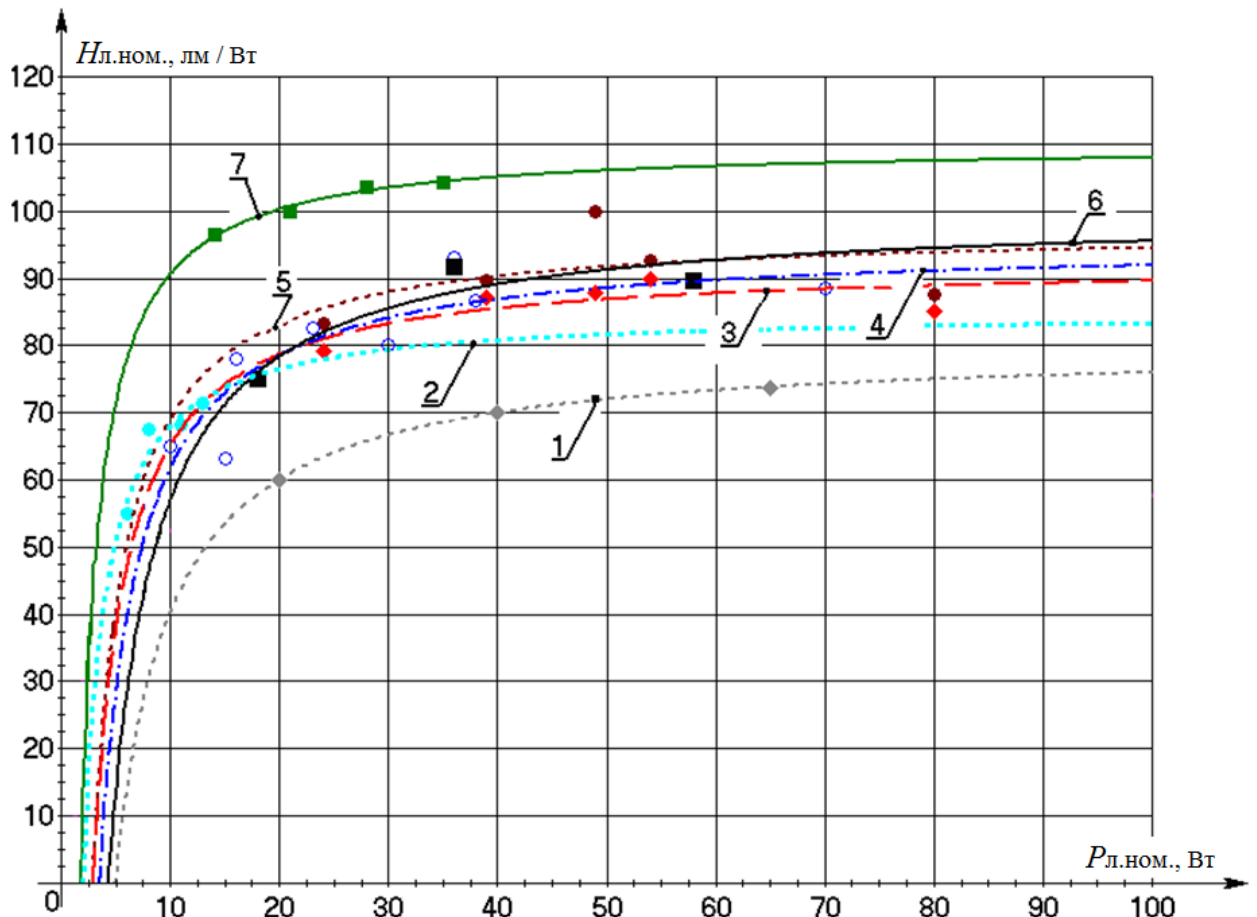


Рис. 2.3. Залежність номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для лінійних ЛЛ: 1 – трубчасті ЛЛ SA T12; 2 – трубчасті ЛЛ LUMILUX T2 FM; 3 – трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HO CONSTANT (зовнішнє освітлення); 4 – трубчасті ЛЛ LUMILUX T8 (26 мм); 5 – трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HO (висока світлова віддача); 6 – трубчасті ЛЛ LUMILUX X XT T8 (75 тис. год); 7 – трубчасті ЛЛ LUMILUX T5 HE (висока ефективність)

Таблиця 2.4

Функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ) (рис. 2.4)

№ графіка на рис. 2.4	Тип компактних люмінесцентних ламп	Аналітичний вираз
1	DULUX SUPERSTAR MINI GLOBE	$H_{\text{л.ном.}} = -75,58 / P_{\text{л.ном.}} + 62,21$
2	OSRAM DULUXSTAR STICK 6 канал.	$H_{\text{л.ном.}} = -76,30 / P_{\text{л.ном.}} + 62,90$
3	DULUX STAR MINI TWIST спіральні	$H_{\text{л.ном.}} = -84,09 / P_{\text{л.ном.}} + 66,18$
4	DULUX INTELLIGENT LONGLIFE.	$H_{\text{л.ном.}} = -72,19 / P_{\text{л.ном.}} + 66,90$
5	DULUX SUPERSTAR MICRO TWIST	$H_{\text{л.ном.}} = -89,17 / P_{\text{л.ном.}} + 70,99$
6	DULUX T/E PLUS для ЕПРА 6 канал.	$H_{\text{л.ном.}} = -140,89 / P_{\text{л.ном.}} + 78,55$
7	DULUX L LUMILUX PL	$H_{\text{л.ном.}} = -430,38 / P_{\text{л.ном.}} + 92,66$

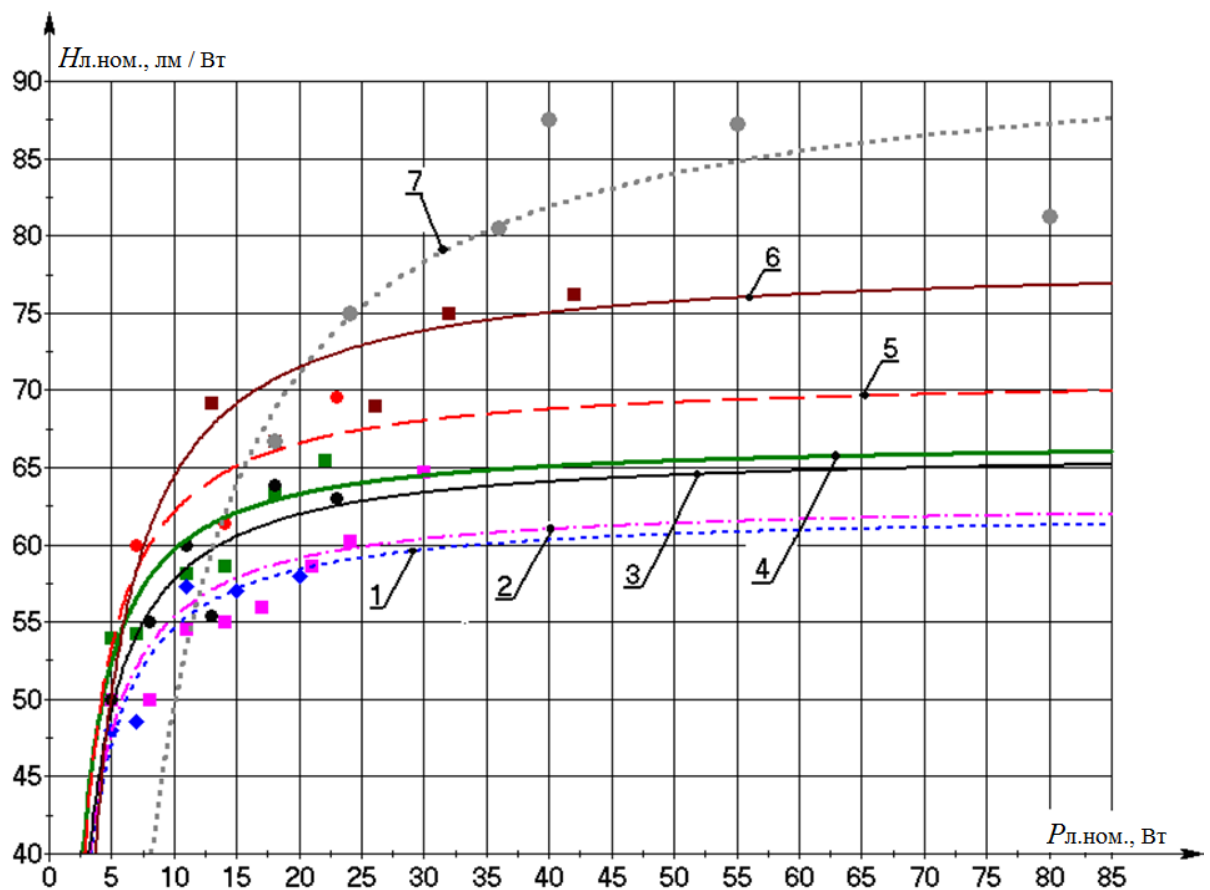


Рис. 2.4. Залежність номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для КЛЛ: 1 – DULUX SUPERSTAR MINI GLOBE; 2 – DULUXSTAR STICK (10 тис. год), 220-240 В, 6 каналні; 3 – DULUX STAR MINI TWIST (8 тис. год), 220-240 В, спіральні; 4 – DULUX INTELLIGENT LONGLIFE (20 тис. год), 220-240 В, 6 каналні; 5 – DULUX SUPERSTAR MICRO TWIST, (12 тис. год), 220-240 В, спіральні; 6 – DULUX T/E PLUS для електронних ПРА; 6 каналні; 7 – DULUX L LUMILUX PL

Таблиця 2.5

Функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для світлодіодних ламп прямої заміни ламп розжарення (рис. 2.5)

№ графіка на рис. 2.5	Типи світлодіодних ламп прямої заміни ламп розжарення	Аналітичний вираз
1	LED STAR CLASSIC P	$H_{\text{л.ном}} = -14,14 / P_{\text{л.ном}} + 65,50$
2	PARANHOM CLASSIC B	$H_{\text{л.ном}} = -23,30 / P_{\text{л.ном}} + 69,55$
3	LED STAR CLASSIC A	$H_{\text{л.ном}} = -99,95 / P_{\text{л.ном}} + 76,75$
4	PARANHOM CLASSIC A ADVANCED	$H_{\text{л.ном}} = -206,35 / P_{\text{л.ном}} + 87,25$

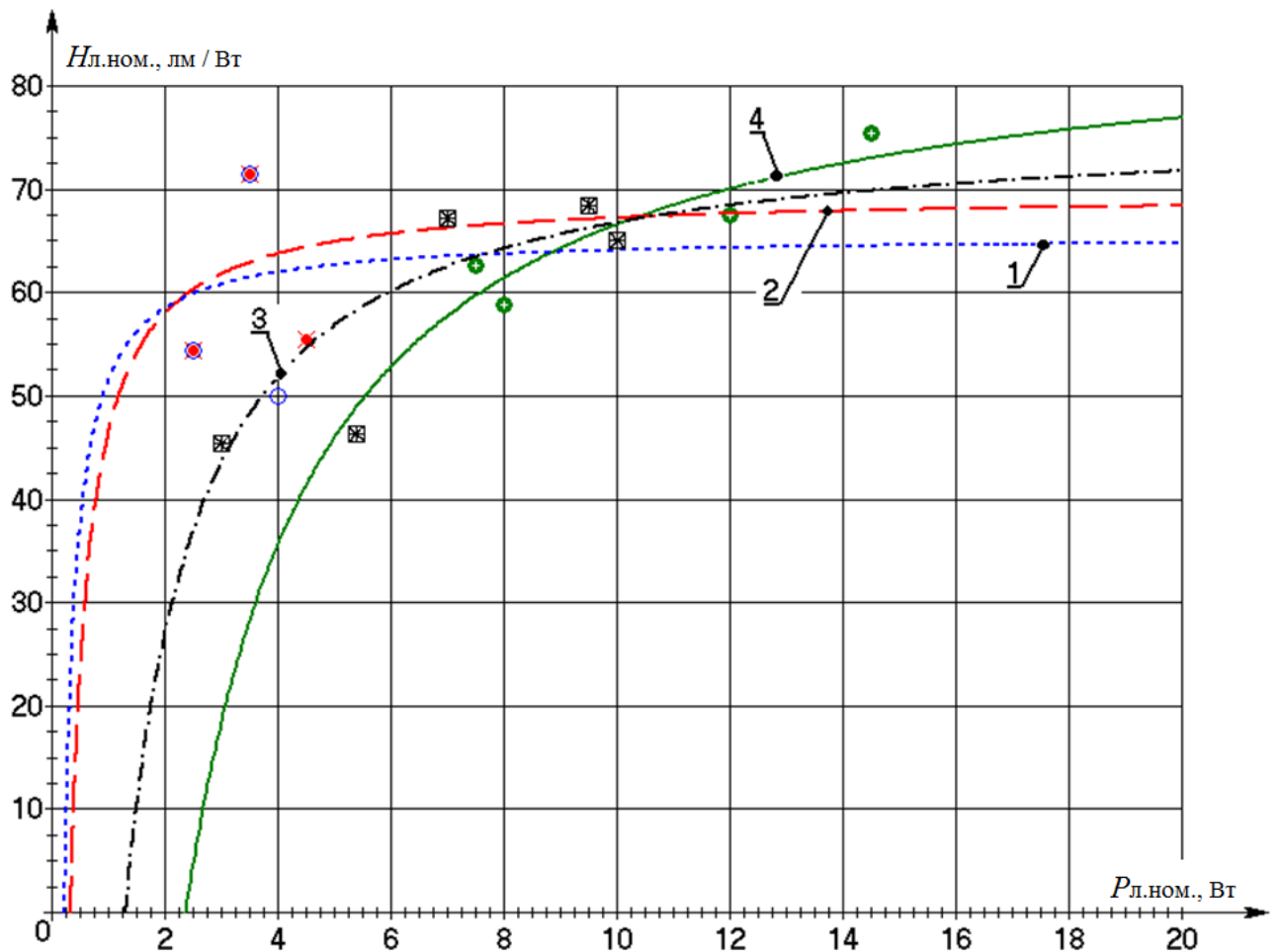


Рис. 2.5. Залежність номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для світлодіодних ламп прямої заміни ламп розжарення (СДЛПЗ): 1 – LED STAR CLASSIC P; 2 – PARANHOM CLASSIC B; 3 – LED STAR CLASSIC A; 4 – PARANHOM CLASSIC A ADVANCED

Таблиця 2.6

Аномальні (падаючі) функціональні залежності номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для окремої групи ДС (рис. 2.6)

№ графіка на рис. 2.6	Типи окремих груп джерела світла	Аналітичний вираз
1	Трубчасті ЛР Special Linestra	$H_{\text{л.ном.}} = 36,76 / P_{\text{л.ном.}} + 6,58$
2	Безелектродні ЛЛ ENDURA	$H_{\text{л.ном.}} = 1754,53 / P_{\text{л.ном.}} + 66,20$
3	Метало-галогенні лампи з керамічними пальниками POWER-BALL HSI-T для закритих світильників	$H_{\text{л.ном.}} = 84,31 / P_{\text{л.ном.}} + 100,17$

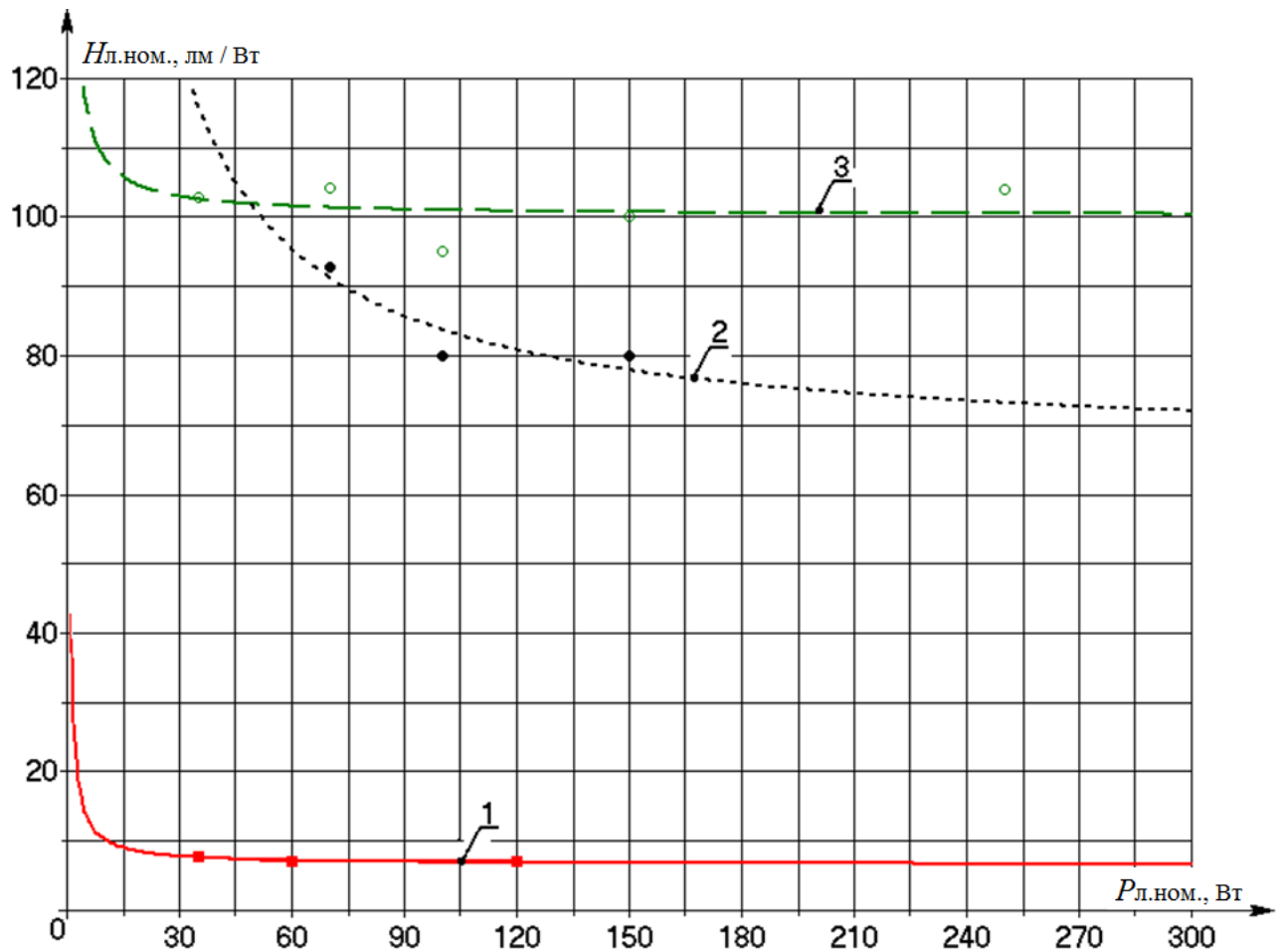


Рис. 2.6. Аномальні (падаючі) залежності номінальних світлових віддач ($H_{\text{л.ном.}}$) від номінальних потужностей ($P_{\text{л.ном.}}$) для: 1 – трубчастих ЛР Special Linestra (для дзеркал); 2 – безелектродних ЛЛ OSRAM ENDURA (230 В, 250 кГц); 3 – метало-галогенних ламп високого тиску з керамічними пальниками для закритих світильників типу POWER-BALL HSI-T

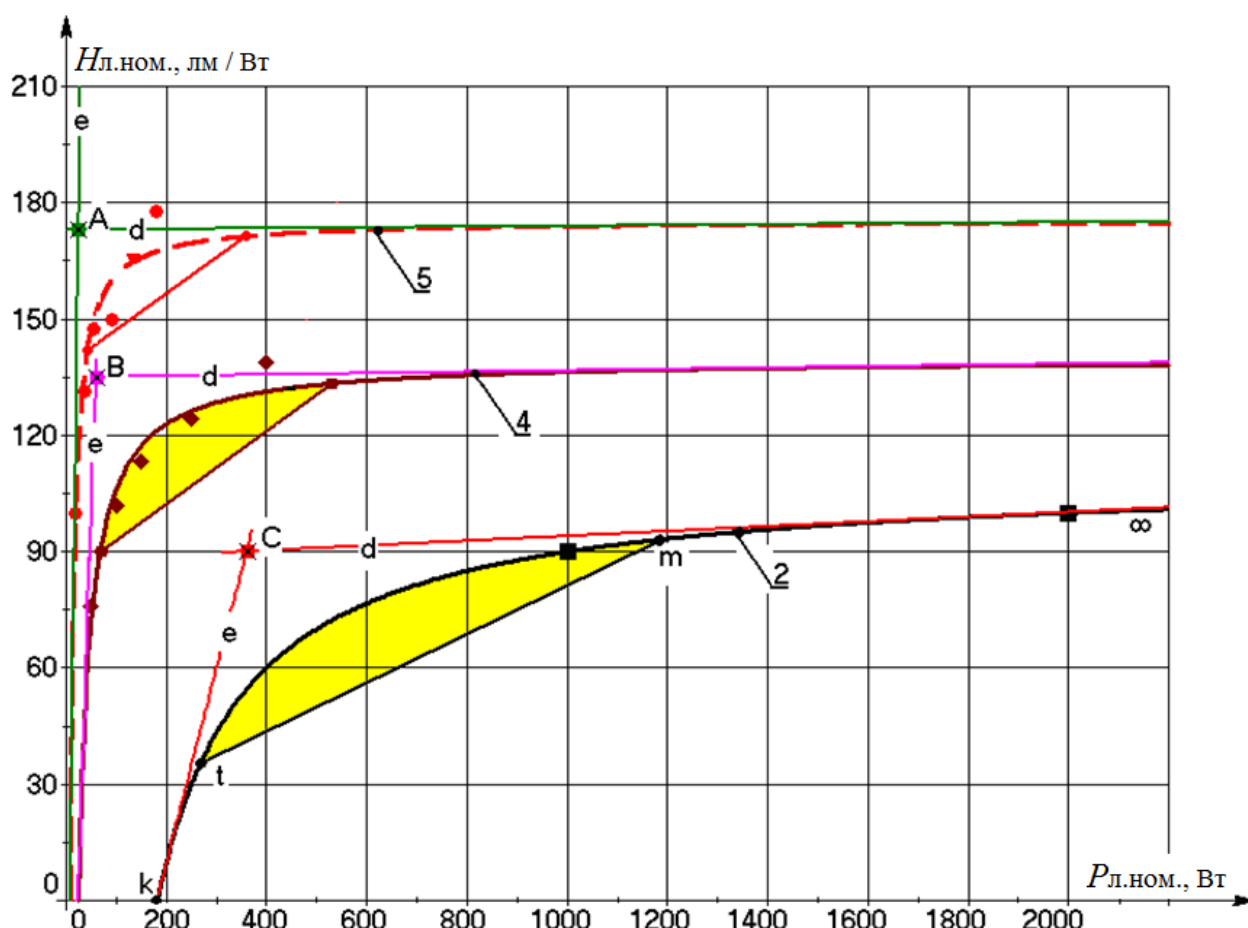


Рис. 2.7. Приклад графічного визначення характерних світлових віддач H_X та потужностей P_X джерел світла в т. А, В та С для побудови відповідних нормованих залежностей для кривих 2, 4, 5 рис. 2.2

Це пояснюється тим, що традиційний шлях підвищення ефективності ТДС за рахунок збільшення температури вольфрамового тіла розжарення добіг свого кінця. Більш суттєве підвищення їхньої ефективності можливе тільки на основі переходу до напівпровідникових тіл розжарення (тантал-карбідних та селективно-відбиваючих інфрачервоне випромінювання плівок [13, 44]). ККД таких ламп може зрости до 20-30 %, що еквівалентно світловим віддачам 60-90 лм/Вт при СТС до 10 тис. год. Враховуючи той факт, що ТДС не потребують струмообмежувальних баластів, втрати в яких сягають 10-25 % від потужності лампи, і є екологічно чистими, вони могли б скласти конкуренцію не лише сучасним ЛЛ, для яких обов'язково потрібен пускорегулювальний апарат і токсична ртуть, але й деяким типам світлодіодних джерел світла, підвищення ефективності яких (мова йде про світлодіодні лампи з високим індексом кольо-

ропередачі для прямої заміни традиційних ТДС) є також проблематичним (рис. 2.5, крива 1 – LED STAR CLASSIC P).

Енергоефективність як світлодіодних ламп прямої заміни, так і світлодіодних світильників помітно нижча, ніж у окремо взятих світлодіодів [43, 44]. Це пояснюється тим, що у світлодіодних виробках відбуваються неминучі втрати власне світлового потоку, обумовлені: а) *нагріванням* кристалу світлодіода та додатковим тепловиділенням від драйверу (10-15 %); б) *втратами* в заломлюючих і відбиваючих елементах вторинної оптики – лінзах з поліметилметакрилату або полікарбонату, які використовують для розширення номенклатури виробів за типами кривих сил світла (8-12 % в лінзах з гладкою поверхнею; 15-30 % в лінзах з грубим світлорозсіювальним мікрорельєфом), які з часом будуть тільки зростати; в) *втратами* в захисному склі (8-15 %). На зниження загальної світлої віддачі також впливають і втрати в драйвері (5-10 %). Тому створення світлодіодних світильників і СДЛПЗ з ККД не менше 60 % є непростю справою.

З'ясувалася також і та обставина, що низька споживана потужність не обумовлює відсутність радіатора у СДЛПЗ. Дослідження показали, що середня тривалість світіння СДЛПЗ без радіатора не перевищує 1000 год. Особливо гострою є проблема відводу тепла у потужних СДЛПЗ. Застосування потужних радіаторів помітно збільшує їх розміри й вагу. Так СДЛПЗ потужністю 10 Вт важить 409 гр, в той час як маса КЛЛ потужністю 11 Вт, з таким самим світловим потоком не перевищує 60 гр, а ЛР – 35 гр. Необхідність застосування радіаторів і особливість випромінювання світлодіодів в одну півсферу (нижню) утруднює створення на їх основі джерел світла зі світлорозподілом, подібним до ламп розжарення загального призначення (ЛРЗП) [43].

Що стосується розрядних ламп високого тиску (рис. 2.2), то до перспектив підвищення їхньої ефективності найбільш схильні метало-галогенні лампи типу POWERSTAR HQI-TS (крива 2 на рис. 2.2) та POWERSTAR HQI-E (крива 3). Вони ще мають деякий резерв щодо підвищення ефективності випромінювання стовпа розряду не тільки за рахунок зменшення частки теплових втрат в об'ємі

і на стінках розрядної трубки, але й за рахунок перерозподілу енергії в спектрі випромінювання, яке викликає найбільшу реакцію людського ока. Дюгові ртутні лампи з люмінофором (HQL STANDART (крива 1)) такі можливості використали повністю. Тому не слід очікувати зростання номінальних світлових віддач як таких, так і при збільшенні номінальних потужностей цих ламп.

Незначні перспективи щодо підвищення світлових віддач при збільшенні потужності є і у натрієвих ламп як високого (типу VIALOX NAV-E SUPER 4Y (крива 4 на рис. 2.2), так і низького (типу SOX (5)) тиску. І це не зважаючи на те, що в експериментальних лабораторних зразках максимальне значення світлової віддачі стовпа розряду натрієвих ламп низького тиску при струмі 100 мА і штучному підігріванні розрядної трубки досягає 360-420 лм/Вт, а у ламп високого тиску – 166 лм/Вт [50, С. 452, 614]. Реальні світлові віддачі у натрієвих ламп низького тиску становлять 177 лм/Вт, а у ламп високого тиску – 139 лм/Вт. Таким чином, серійні зразки натрієвих ламп високого тиску впритул наблизилися до експериментальних лабораторних значень світлових віддач за рахунок впровадження РІА технологій, а у натрієвих ламп низького тиску цей показник майже вдвічі менший від досягнутих лабораторних значень. Це пояснюється тим, що в реальних зразках поки що не вдається при низьких густинах струму підтримувати високі значення температури розрядної трубки на оптимальному рівні 270-290°C.

Зважаючи на те, що у ЛЛ у світло може перетворитися від 37 до 44 % споживаної електричної енергії, їхня світлова віддача при енергетичному еквіваленті білого світла в 320 лм/Вт теоретично може бути рівною 120-140 лм/Вт [145, 146]. Це вказує на те, що можливості щодо підвищення як взагалі світлової віддачі, так й зі зростанням потужності ЛЛ поки ще є (рис. 2.3). В найбільшій мірі до цього схильні прямі ЛЛ типу SA T12 (рис. 2.3, крива 1), а також LUMILUX T5 HO (крива 5), LUMILUX X XT T8 (6) та LUMILUX T5 HE (крива 7).

Можливості збільшення світлової віддачі КЛЛ у їхньому сучасному вигляді для більшості типів ламп майже вичерпані – це не тільки високочастотне

живлення, застосування сучасних багато смугових люмінофорів, перехід до менших діаметрів розрядних трубок, але й застосування сучасного аргон-криптонового наповнення і амальгами ртуті. Незважаючи на це, як видно з графіків рис. 2.4, ще є деякі типи КЛЛ, світлова віддача яких з ростом потужності має тенденції до зростання. Це в першу чергу лампи DULUX L LUMILUX PL (крива 7 на рис. 2.4), DULUX T/E PLUS (крива 6) та DULUX SUPER-STAR MICRO TWIST (крива 5).

В процесі аналізу з'ясувалося, що є і такі джерела світла (абсолютно різні за фізичними принципами їхньої дії), у яких світлова віддача з ростом потужності зменшується (рис. 2.6). В найбільшій мірі це відноситься до безелектродних ЛЛ типу ENDURA (крива 2 на рис. 2.6), в меншій – до трубчастих ЛР Special Linestra (1) та метало-галогенних лампи високого тиску з керамічними пальниками типу POWER-BALL HCI-T (крива 3 на рис. 2.6).

Аналіз показав, що з графіків, наведених на рис. 2.1 – 2.6 важко визначити конкретні значення можливих змін (зростання або зменшення) світлових віддач з ростом номінальних потужностей ДС. Саме тому для цього нами була розроблена спеціальна методика. Суть цієї методик полягає у наступному. Для визначення конкретних значень можливих змін світлових віддач (зростання або зменшення) з ростом потужностей необхідно:

1) визначити характерні значення світлових віддач H_x та потужностей P_x ДС, які нас цікавлять. Для цього до графічних залежностей $H_{л.ном.} = f(P_{л.ном.})$ ДС необхідно провести дотичні d та e так, як це показано на рис. 2.7. В точках перетину дотичних (на рис. 2.7 це точки А, В і С) визначити характерні значення H_x у лм/Вт та P_x у Вт;

2) в n точках ($n = 5-10$) на кривих $H_{л.ном.} = f(P_{л.ном.})$ визначити конкретні значення світлових віддач $H_1...H_{10}$ та потужностей $P_1...P_{10}$;

3) визначити нормовані значення світлових віддач $H_{нл}$ та потужностей $P_{нл}$, поділивши отримані в п. 2 дані на характерні світлову віддачу та потужність ДС ($H_{нл} = H_1 / H_x ... H_{н10} = H_{10} / H_x$ та $P_{нл} = P_1 / P_x ... P_{н10} = P_{10} / P_x$);

4) за отриманими нормованими даними побудувати графік (у відносних одиницях) гіперболічної залежності ($H_n = H / H_x = f(P_n = P / P_x)$) так, як це показано на рис. 2.8;

5) визначити величину можливих змін світлових віддач (зростання або спадання) з ростом номінальних потужностей. Якщо отримана залежність зростає і проходить вище горизонтальної прямої, проведеної через ординату 1, то

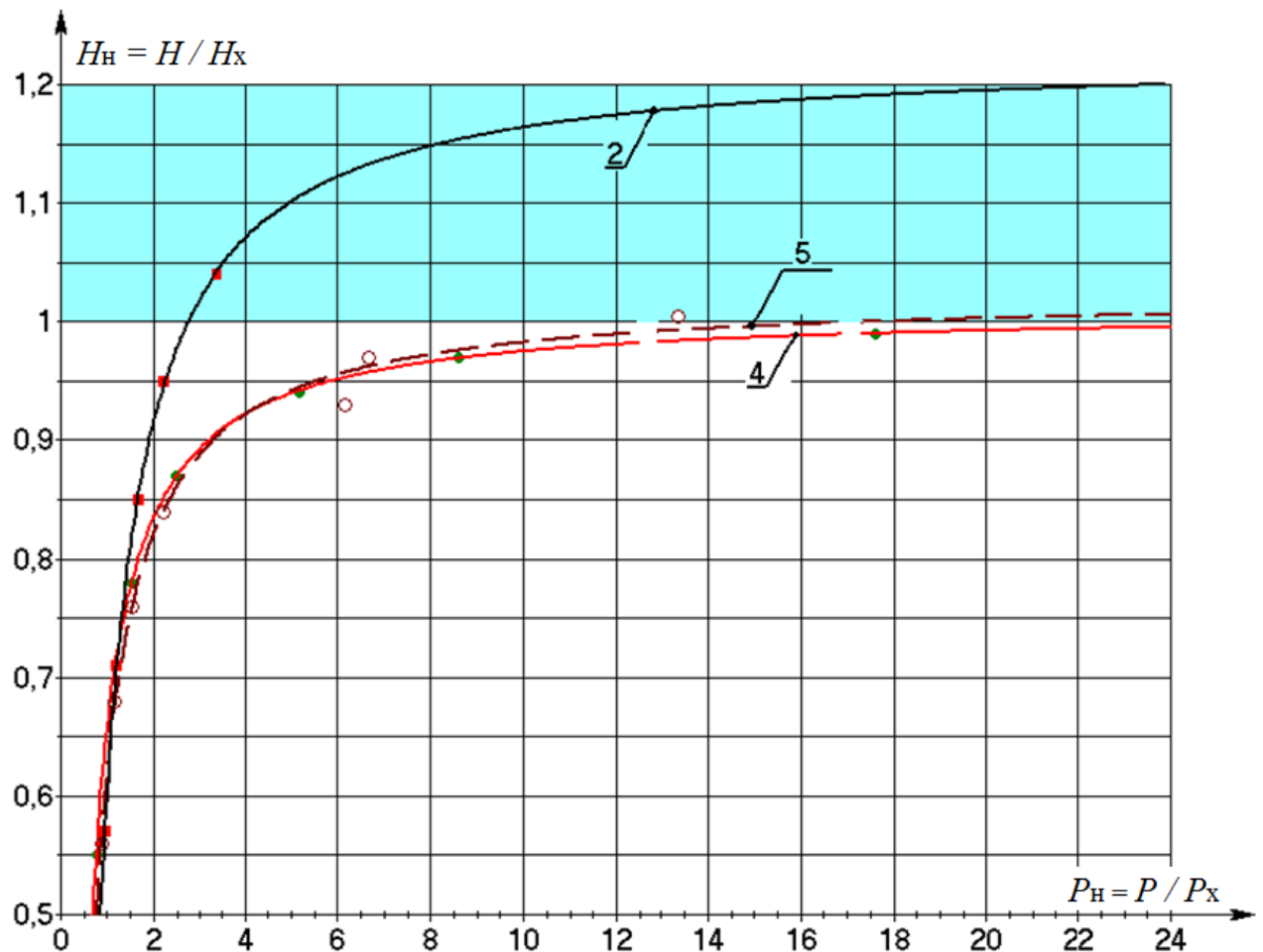


Рис. 2.8. Залежність нормованих світлових віддач від нормованих потужностей джерел світла для кривих 2, 4, 5 рис. 2.2

можливе зростання світлових віддач з ростом потужності буде характеризувати та частина кривої, яка знаходиться вище ординати 1 (на рис. 2.8 це затінена площа). Таким чином, зростання номінальної світлової віддачі із зростанням номінальної потужності розрядних ламп високого тиску можна очікувати тільки для метало-галогенних ламп з кварцовим пальником POWERSTAR HQI-TS (крива 2 на рис. 2.2 та на рис. 2.8). Якщо ж отримана залежність не виходить за

межі горизонтальної прямої, проведеної через ординату 1, то зростання світлової віддачі з ростом потужності очікувати не слід. Це натрієві лампи високого та низького тиску (криві 4 і 5 на рис. 2.2 та на рис. 2.8).

Аналогічні міркування слід використовувати і при аналізі спадаючих залежностей номінальних світлових віддач від номінальних потужностей ДС [141].

У зв'язку з тим, що всі розрядні ДС низького і високого тиску потребують для своєї роботи пускорегулювальні апарати, в яких виникають додаткові втрати потужності, результуюча світлова віддача комплектів ДС+ПРА буде нижчою від заявленої в каталогах. Для того щоб визначити, яким чином впливають втрати в електромагнітних ПРА на світлову віддачу ДС, нами були побудовані відповідні залежності (рис. 2.9).

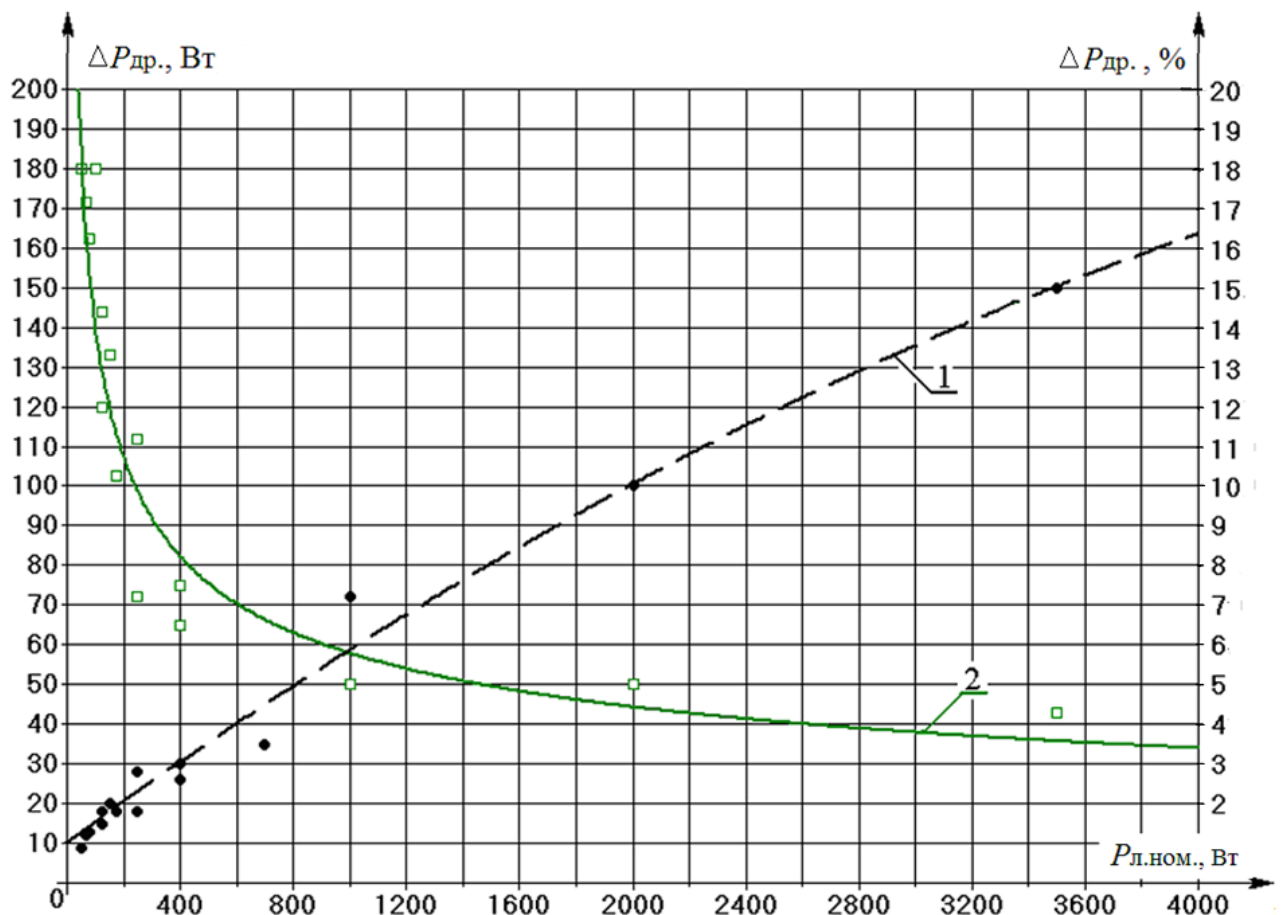


Рис. 2.9. Залежність втрат в ЕмПРА $\Delta P_{др.}$ від номінальних потужностей розрядних ламп, для яких вони призначенні: 1 – абсолютні втрати у Вт; 2 – відносні втрати у % від номінальних потужностей ламп

З рис. 2.9 випливає, що при збільшенні потужності ДС абсолютні значення втрат потужності в ЕмПРА зростають, а в процентному – зменшуються за степеневим законом

$$\Delta P_{\text{др}} = K_{\text{в}} \cdot P_{\text{дс.ном}}^{-0,385}, \% \quad (2.1)$$

де $K_{\text{в}} = 826,3$ – коефіцієнт пропорційності, $\text{Вт}^{0,385}$

Тому найкраще використовувати більш потужні ДС. Для зовнішнього освітлення це розрядні лампи високого тиску потужністю від 150 Вт до 1000 Вт, що добре узгоджується з графіками рис. 2.2. Позитивний ефект від подальшого збільшення потужності буде незначним.

2.2. Гранично можливі світлові віддачі джерел білого світла

У 1996 р. в компанії Nichia японському інженеру Суджі Накамура вдалося вперше отримати світлодіод білого кольору. У 2003 р. компанія Lumileds Lighting створила потужний білий світлодіод Luxeon I із світловою віддачею 20 лм/Вт. У 2004 р. компанія Cree Lighting випустила білий світлодіод XL7090 із світловою віддачею 50 лм/Вт, а в 2006 р. з'являється світлодіод XR-E7090 із світловою віддачею 90 лм/Вт. У лютому 2010 р. на сайті компанії Cree з'явилося повідомлення про світлодіоди із світловою віддачею 200 лм/Вт. У лютому 2013 р. створено лабораторні зразки із світловою віддачею 276 лм/Вт, а серійні підійшли до рівня 200 лм/Вт [147, 148, 149], у той час як світлова віддача реальної світлотехнічної продукції знаходиться в межах 80-100 лм/Вт. Це приблизно як у Сонця, світлова віддача якого оцінюється в 93-100 лм/Вт [150].

Якою ж може бути максимально можлива величина світлового потоку і світлової віддачі у світлотехнічної продукції на основі білих світлодіодів – от що цікавить в теперішній час розробників НДС. За розрахунками різних спеціалістів в галузі виробництва потужних білих світлодіодів, теоретичний максимум ефективності знаходиться в межах від 283 лм/Вт до 340 лм/Вт [151]. З'ясуємо це питання.

Основною залежністю для оцінки якісних і кількісних характеристик джерел світла може служити тільки крива видимості $V(\lambda)$, яка і визначає ту частку випромінювання, яка сприйматися людським оком. Ця залежність нормована [152]. За одиницю прийнята чутливість $V(\lambda)$ при довжині хвилі випромінювання λ , яка відповідає максимальній чутливості ока. Для денного світла (коли активні колбочки) вона дорівнює $\lambda = 0,555$ мкм, а для нічного (коли активні пали-

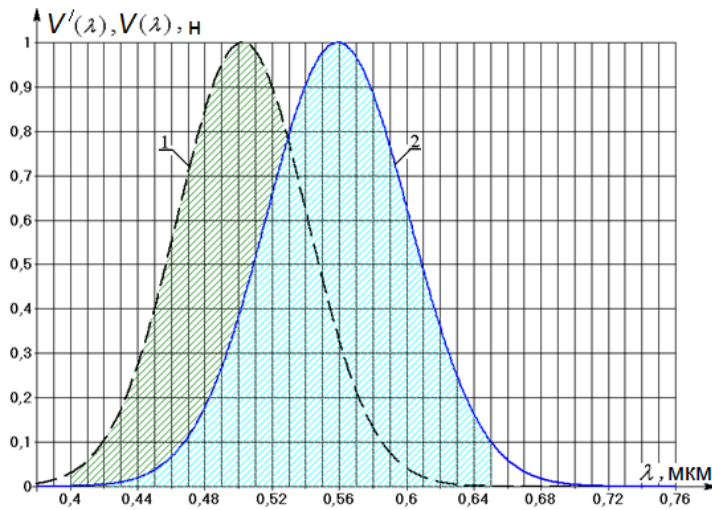


Рис. 2.10. Відносна спектральна чутливість людського ока адаптована до: 1 – нічних ($V'(\lambda)$) і 2 – денних ($V(\lambda)$) яскравостей, побудованих за формулами (2.2) і (2.4)

чки) $\lambda = 0,507$ мкм. Для денного зору при довжинах хвиль $\lambda = 0,510$ мкм і $\lambda = 0,610$ мкм і нічного зору при довжинах хвиль $\lambda = 0,455$ мкм і $\lambda = 0,550$ мкм спектральна чутливість ока падає вдвічі (рис. 2.10).

Якщо мова йде про випромінювання складного спектрального складу, то світловий потік ДС може бути визначений

як сума елементарних світлових потоків всіх його монохроматичних складових

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

де K_{\max} – коефіцієнт пропорційності, який називають максимальною світловою ефективністю випромінювання. Якщо потужність вимірюється у Вт, а світловий потік у люменах, то K_{\max} дорівнює числу люмен світлового потоку, зв'язаних з потоком випромінювання у один ват при тій довжині хвилі, для якої $V(\lambda) = 1$, тобто для $\lambda = 0,555$ мкм [$K_{\max} = 683$ лм/Вт];

$dP = P_{\lambda} \cdot d\lambda$ – сумарна потужність ДС, яка складається з елементарних потужностей, яка переноситься випромінюванням з довжинами хвиль, розташованими у вузькому спектральному інтервалі від λ до $(\lambda + d\lambda)$.

Таким чином площа, обмежена кривою усередненої відносної спектральної чутливості ока (кривою видності) і віссю абсцис, пропорційна світловому потоку. Якщо світловий потік виразити у світлових Вт, то можна прийти до висновку, що один світловий Вт еквівалентний 683 лм/Вт для $\lambda = 0,555$ мкм. Це дійсно до тих пір, поки зберігається спектральний склад випромінювання і спектральна чутливість ока.

Криві видності для денного і нічного зору, прийняті МКО ще у 1924 р. [150, 153], добре апроксимуються (похибка не перевищує 1,3 %) у діапазоні довжин хвиль від 0,380 мкм до 0,760 мкм наступними гауссоїдами [154, 155]

а) для денного зору у діапазоні температур (рис. 2.10, крива 2)

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

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

б) для нічного зору у діапазоні температур (рис. 2.10, крива 1)

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

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

Денний зір – це зір нормального ока при його адаптації до рівнів яскравості, починаючи з 10 кд/м^2 , тобто при освітленості поверхні з коефіцієнтом відбивання 0,6 не менше 50 лк. Нічний зір – при яскравості менше $0,01 \text{ кд/м}^2$, тобто при освітленості не більше 0,5 лк до тієї ж поверхні [156]. У проміжку знаходиться присмеркове бачення. Крива видності нормалізована МКО при яскравості 100 кд/м^2 для денного зору і 10^{-4} кд/м^2 – для нічного [157].

Визначення можливих світлових віддач джерел білого світла (в тому числі і напівпровідникових) в залежності від ширини інтервалу електромагнітних випроміню-

вань, до яких чутливе людське око в нічний і денний час, ми проводили наступним чином: 1. За формулами (2.2) і (2.4) для вибраних діапазонів довжин хвиль електромагнітного випромінювання $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ шляхом безпосереднього інтегрування визначалися площі під кривими видності $S_{\text{пк}}$ (див. табл. 2.7 та табл. 2.8) і рис. 2.11.

Таблиця 2.7

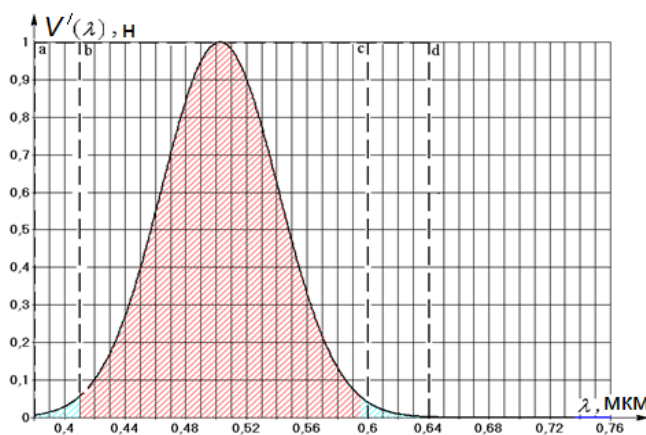
Дані для визначення світлових віддач за кривою видності людського ока, адаптованої для денних яскравостей				
λ_{\max} , мкм	λ_{\min} , мкм	$S_{\square} = \Delta\lambda =$ $= \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$	$S_{\text{пк}}$, мкм	H , лм/Вт
0,58	0,54	0,04	0,0385678	658
0,67	0,47	0,20	0,1043256	356
0,66	0,46		0,1047518	
0,67	0,45	0,22	0,1057228	328
0,675	0,445	0,23	0,1060301	316
0,70	0,44	0,26	0,1064446	279
0,69	0,42	0,27	0,1066016	270
0,70	0,42	0,28	0,1066640	260
0,72	0,42	0,30	0,1067054	243
0,70	0,40		0,1067127	
0,72	0,40	0,32	0,1067541	228
0,74	0,40	0,34	0,1067614	215
RGB зміш.		0,024	$7,57041973 \cdot 10^{-3}$	215
0,76	0,38	0,38	0,1067711	192

Таблиця 2.8

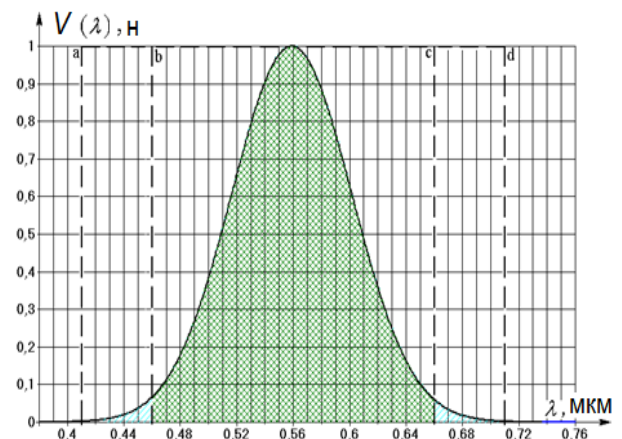
Дані для визначення світлових віддач за кривою видності людського ока, адаптованої для нічних яскравостей				
λ_{\max} , мкм	λ_{\min} , мкм	$S_{\square} = \Delta\lambda =$ $= \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$	$S_{\text{пк}}$, мкм	H , лм/Вт
1	2	3	4	5
0,625	0,380	0,245	0,0967731	217
0,650	0,380	0,270	0,0967667	245
0,660	0,400	0,260	0,0964583	253
0,640	0,390	0,250	0,9641150	263
0,626	0,380	0,246	0,0967058	268

Продовження табл. 2.8

1	2	3	4	5
0,610	0,390	0,220	0,09665448	300
0,604	0,400	0,204	0,09604340	322
0,594	0,410	0,184	0,09517470	353
0,560	0,440	0,120	0,08510770	484
0,548	0,457	0,091 синій+синє- зелений +зелений	0,0737066	553



а)



б)

Рис. 2.11. Ілюстрація розрахунку можливих світлових віддач джерел білого світла для умов: а) нічного і б) денного зору

2. Для тих самих діапазонів довжин хвиль визначалися площі прямокутників S_{\square} , які для прикладу на рис. 2.11 обмежені пунктирними лініями 0-a-d-0,64 (0,41-a-d-0,71) або 0,41-b-c-0,6 (0,46-b-c-0,66) і пропорційні світловій віддачі 683 лм/Вт.

3. Шукані величини світлових віддач знаходилися за виразом

$$H = 683 \cdot S_{\text{пк}} / S_{\square}, \quad \text{або} \quad H = 683 \cdot S_{\text{пк}} / (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}), \text{ лм/Вт}, \quad (2.6)$$

де λ_{max} , λ_{min} – максимальне і мінімальне значення довжини хвиль електромагнітного випромінювання, вибраного для аналізу діапазону, мкм;

$S_{\text{пк}}$, S_{\square} – площі під кривою видимості людського ока і прямокутників, які обмежують вибраний діапазон електромагнітних випромінювань у видимій області спектру. Вимірюються у мкм тому, що вісь ординат нормована.

Результати розрахунків наведено у табл. 2.7 і 2.8, за якими побудовано відповідні залежності, представлені на рис. 2.12. Отримані залежності добре апроксимуються виразами: а) (2.7) для денного зору – стандартне відхилення 9,6; $R^2 = 0,991$ і б) (2.8) для нічного – стандартне відхилення 0,58; $R^2 = 0,999$.

$$H = 3332,654 \cdot \Delta\lambda^2 - 2804,359 \cdot \Delta\lambda + 779,888, \text{ лм/Вт}, \quad (2.7)$$

$$H = 4164,634 \cdot \Delta\lambda^2 - 3157,568 \cdot \Delta\lambda + 792,842, \text{ лм/Вт}. \quad (2.8)$$

Аналіз отриманих залежностей показав, що при симетричному зменшенні діапазону електромагнітних випромінювань $\Delta\lambda$ (коли при λ_{\max} і λ_{\min} величини ординат однакові) світлова віддача невинно зростає (зрозуміло при зменшенні індексу кольоропередачі) досягаючи свого максимального значення 683 лм/Вт при $\Delta\lambda \rightarrow 0$, характерного для монохроматичного випромінювання, для денного зору – жовтого $\lambda = 555$ нм, для нічного – синє-зеленого $\lambda = 507$ нм.

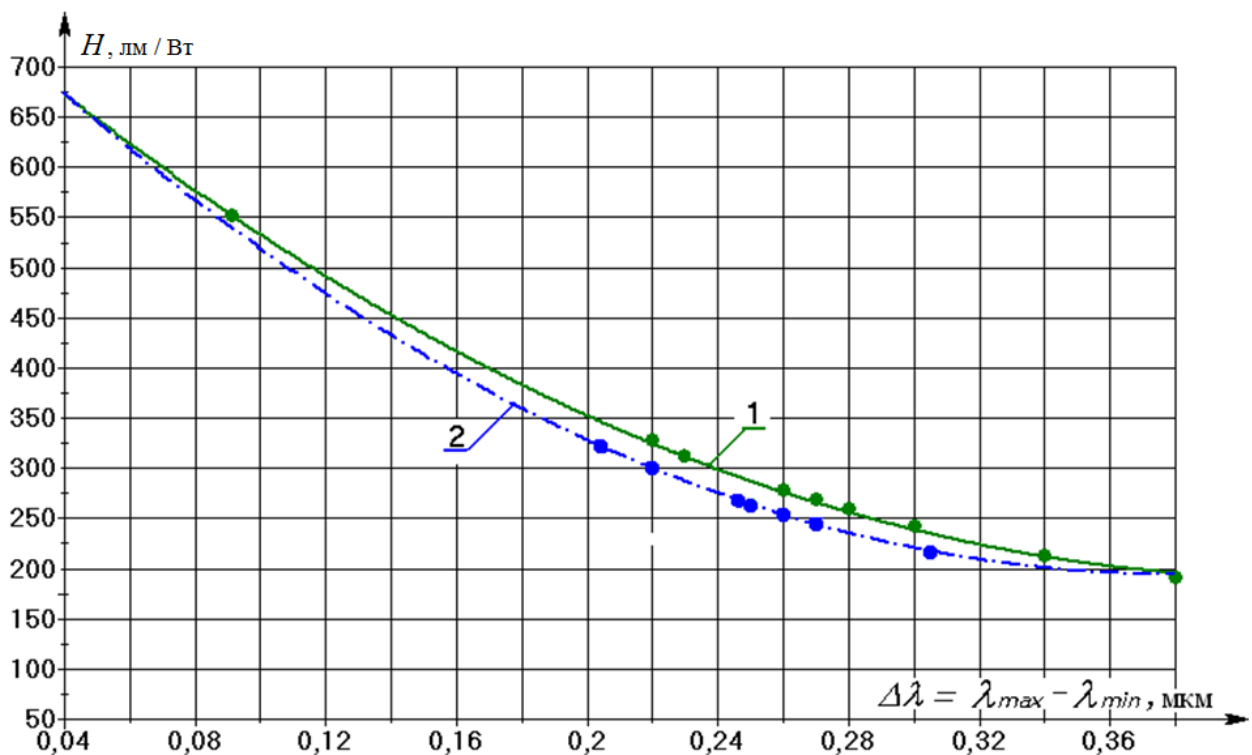


Рис. 2.12. Залежність світлової віддачі джерел випромінювання від ширини вибраного діапазону електромагнітних випромінювань у видимій області спектру для: 1 – денного і 2 – нічного зору

При змішуванні трьох основних кольорів RGB (655 ± 4 нм, 527 ± 4 нм, 470 ± 4 нм) світлова віддача ДС для денного зору виходить рівною 215 лм/Вт, тобто такою ж, як і в табл. 2.7 для діапазону 0,40-0,74 мкм, а для нічного – 346 лм/Вт тобто такою ж, як і в табл. 2.8 для діапазону 0,410-0,594 мкм.

Таким чином, максимальна світлова віддача ідеального білого джерела світла для денного зору не може перевищувати 192 лм/Вт, а для нічного – 245 лм/Вт. При RGB змішуванні – 215 лм/Вт і 346 лм/Вт відповідно. При використанні ДС з випромінюванням в області спектру (0,457 – 0,548) мкм, тобто з повною втратою фіолетового, жовто-зеленого, жовтого, рожевого і червоного випромінювання, світлова віддача адаптована для нічних яскравостей сягає 553 лм/Вт, а для денних – 312 лм/Вт.

Світлові віддачі реальних ДС будуть меншими, ніж наведено у табл. 2.7, і 2.8 тому, що площі під кривими видності не будуть повністю заповненні не тільки за інтенсивністю, але й за спектром. Для їх заповнення необхідні більші потужності, що і обумовить падіння світлових віддач.

Реально досяжні значення світлових віддач власне світлодіодів можуть бути рівними: а) для ідеально білих, з індексом кольоропередачі $R_a \rightarrow 100\%$, $H_p = 192(215) \cdot k_Q = 192(215) \cdot 0,615 = 118(131)$ лм/Вт для менших значень R_a – $H_p = 279 \cdot k_Q = 279 \cdot 0,615 = 172$ лм/Вт, де k_Q – коефіцієнт перетворення електричної енергії у світлову визначався нами на основі реально існуючих даних для натрієвих ламп низького тиску як відношення реально досягнутої світлової віддачі в лабораторних умовах (420 лм/Вт) до максимально можливого, для жовтого випромінювання, її значення (683 лм/Вт): $k_Q = 420 / 683 = 0,615$. У складі готового світлотехнічного виробу світлова віддача буде, згідно з формулою (1.1), ще нижче – від 0,32 до 0,74 від зазначених вище значень, а саме: 38-88 лм/Вт для ідеально білих світлодіодів з $R_a \geq 93$ та 55-127 лм/Вт для світлодіодів з пониженим індексом кольоропередачі [158].

2.3. Вплив геометричних параметрів люмінесцентних ламп на динаміку електричних і світлотехнічних характеристик в процесі поступової зміни частоти напруги живлення

Відомо, що удосконалення джерел світла обумовлено пошуком шляхів зниження річних витрат на електроенергію. Саме тому в теперішній час найбільш поширеним джерелом світла стали люмінесцентні лампи. Лінійні ЛЛ широко застосовують для освітлення громадських та адміністративних споруд, а компактні – впевнено витісняють з житлових приміщень лампи розжарення. На зміну звичайним ЛЛ Т12 потужністю 20, 40, 65 Вт в колбі діаметром 38 мм, прийшли високоефективні, з більшими на 25 % світловими віддачами ЛЛ Т8 – потужністю 18, 36, 58 Вт в колбі діаметром 26 мм. З'явилися на світовому ринку тонкі (Т5, діаметром 16 мм) потужністю 14, 21, 28 і 35 Вт зі світловими віддачами 55, 67, 68 і 72 лм/Вт відповідно і супертонкі (Т2, діаметром 7 мм) ЛЛ потужністю 6, 8, 11 і 13 Вт з світловими віддачами 55, 67, 68 і 72 лм/Вт відповідно.

Аналіз останніх досліджень та публікацій [12, 20, 106, 144, 159, 160] показав, що в процесі реалізації заходів щодо енергозбереження люмінесцентні лампи займають лідируючі позиції. Їхнє удосконалення відбувається на основі підбору варіантів газового наповнення – перехід від чисто аргонових до аргон-кріп-тонових сумішей, створення трьохшарових рідкоземельних люмінофорів та зменшення діаметру колб від 38 мм до 7 мм. Доведено, що експлуатація тонких і супертонких ЛЛ можлива виключно на основі застосування електронних високочастотних пускорегулювальних апаратів. Не зважаючи на це публікації, пов'язані з проведенням комплексних порівняльних досліджень поведінки електричних та світлотехнічних характеристик звичайних Т12, енергоефективних Т8, тонких Т5 та супертонких Т2 ЛЛ при поступовій безперервній зміні частоти напруги живлення від 50 Гц до 150 кГц представлені недостатньо повно. Саме тому нами були проведені дослідження щодо визначення впливу геометричних параметрів ЛЛ в колбах Т12, Т8, Т5, Т2 та спеціально виготовлених ко-

ротких Т12 (СВК), з між електродними відстанями $l_{\text{ел}} = 4\text{-}11$ см, на динаміку електричних і світлотехнічних характеристик в процесі поступової зміни частоти напруги живлення від 50 Гц до 150 кГц [161].

Для проведення досліджень був використаний ламповий підсилювач потужності, який дозволяв здійснювати живлення ЛЛ у діапазоні частот від 50 Гц до 150 кГц від зовнішнього джерела змінної напруги (ГЗ -109). Струмообмежувальним опором для ЛЛ виступав внутрішній опір підсилювача потужності, величину якого можна було регулювати в широких межах. Це дало можливість провести дослідження електричних і світлотехнічних характеристик ЛЛ при поступовій безперервній зміні частоти напруги живлення.

На рис. 2.13 зображена схема, за якою проводилися дослідження. В якості зовнішнього джерела змінної напруги використовувався генератор сигналів низькочастотний ГЗ-109, частота якого змінювалася в межах 20 Гц - 150 кГц. У склад вимірювальної схеми також входили: ЧЗ-34А – частотомір електронно-лічильний; ПП – підсилювач потужності; Ф5263 зі струмовимірювальною приставкою Ф5051 – мілівольтамперметр; В7-16 – вольтметр універсальний; С1-83 – осцилограф двопробеневий. Дослідження проводилися виключно з відпаленими протягом 100 годин ЛЛ при температурі оточуючого середовища 18-25°C і відносній вологості не більше 70 %. Вимірювання світлового потоку проводилося у двохметровій фотометричній кулі та у фотометричній кулі «SPEKTRON Coating Integracion Sphere» ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА». Для забезпечення відтворюваності дослідів кількість ЛЛ, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною шести [162].

На описаній установці були проведені наступні експериментальні дослідження:

– визначення залежності діючих значень напруг на ЛЛ ($U_{\text{л}}$) в колбах різного діаметру і довжини від частоти синусоїдальної напруги, яка прикладається до ламп, при: а) підтриманні струму на номінальному рівні $I_{\text{л}} = I_{\text{л.ном}} = \text{const}$; б) зміні струму від $0,7 \cdot I_{\text{л.ном}}$ до $1,3 \cdot I_{\text{л.ном}}$;

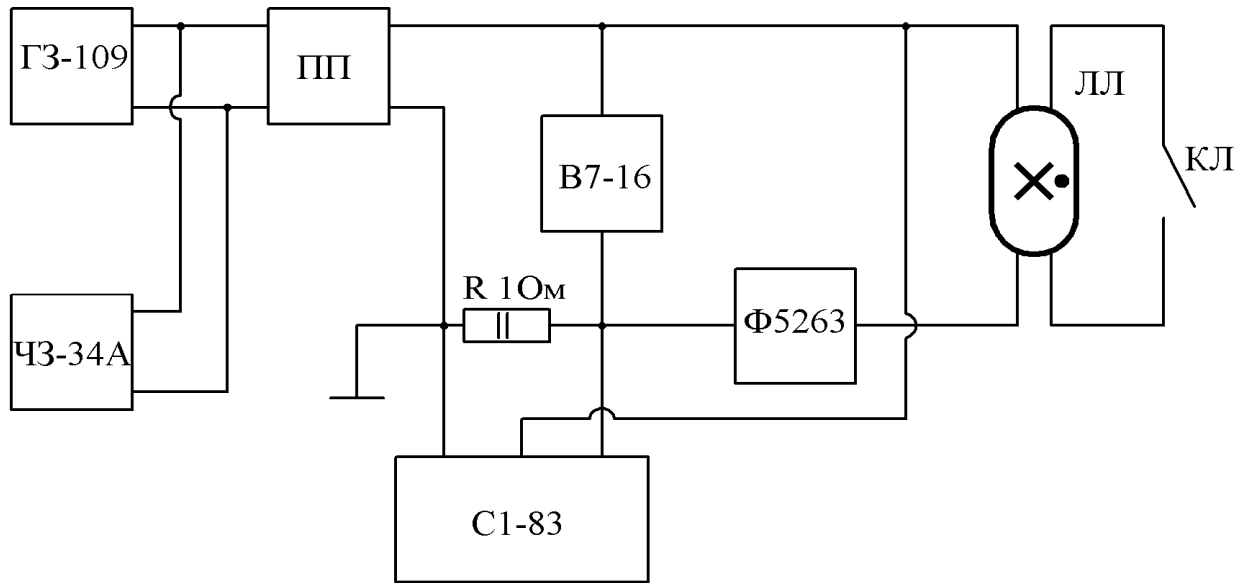


Рис. 2.13. Схема для дослідження динаміки параметрів ЛЛ в процесі поступової безперервної зміни частоти напруги живлення від 50 Гц до 150 кГц

– визначення залежності світлового потоку від частоти напруги живлення.

Дослідження проводилися за наступною методикою.

1. Після ввімкнення дослідної установки та вимірювальних приладів здійснювалося їхнє прогрівання протягом часу, який указаний у відповідних інструкціях із експлуатації.

2. Після закінчення підготовчих робіт на підсилювач потужності (ПП) із виходу генератора ГЗ-109 подавалася напруга частотою 50 Гц такої величини, при якій на затискачах ЛЛ вона становила $(1,5 - 2,0 \cdot U_{\text{л.ном}})$ для досліджуваного типу ЛЛ ($U_{\text{л.ном}}$ – номінальна напруга на лампі).

3. Замиканням ключа КЛ у пусковій ланці ЛЛ здійснювалося попереднє підігрівання електродів ламп протягом 2-3 сек. Після цього ключ розмикався, ЛЛ запалювалася й установлювався струм, рівний номінальному для даного типу ламп. Після прогрівання лампи протягом 900 с здійснювалися вимірювання напруги на лампі ($U_{\text{л}}$) та частоти (f) напруги живлення. Форма струму $i_{\text{л}}$ й напруги $u_{\text{л}}$ на ЛЛ контролювалася за допомогою осцилографа.

4. Встановлювалась наступне значення частоти напруги живлення, й через 300 с здійснювалися вимірювання $U_{\text{л}}$ і f та зняття осцилограм $i_{\text{л}}$ та $u_{\text{л}}$.

5. Після закінчення вимірів на частоті 150 кГц здійснювалася заміна ЛЛ на іншу того ж типономіналу і дослідження повторювалися, починаючи з п. 3. Отримані результати для шести ЛЛ усереднювалися.

6. Починаючи з п. 3 у тій самій послідовності вимірювалися параметри ЛЛ наступних типономіналів.

Для отримання даних щодо впливу струму на характеристики ЛЛ дослідження проводилися в тій самій послідовності, починаючи з п.1 і по п. 3, що й у попередній методиці, а далі:

4. Після розігрівання ЛЛ номінальним струмом протягом 900 с установлювалися необхідні значення частоти (починаючи з 50 Гц) і струму лампи (починаючи з $0,7 \cdot I_{\text{л.ном}}$).

5. Через 300 с здійснювалося вимірювання, після чого встановлювалося наступне значення струму ЛЛ.

6. Після завершення вимірювань при струмі лампи, рівному $1,3 \cdot I_{\text{л.ном}}$, встановлювалося наступне значення частоти напруги живлення й повторювалися дослідження, починаючи з п. 4. Наступні вимірювання проводилися в тому ж порядку, що й у попередній методиці, починаючи з п. 5.

За результатами вимірювань були побудовані залежності нормованих значень напруги на лампі $U_{\text{л.н}} = U_{\text{л}} / U_{\text{л.ном}}$ від частоти напруги живлення f для ЛЛ: а) з однаковим діаметром, але різною довжиною (рис. 2.14); б) майже однаковою довжиною, але різного діаметру (рис. 2.15). Аналіз рисунків показав, що з ростом частоти напруга на лампі спочатку спадає повільно, а потім швидше, досягаючи мінімуму на граничній частоті f_0 . Після цього напруга знову починає зростати. Починаючи з 10 кГц напруга на лампі зростає за гіперболічним законом

$$U_{\text{л}} = -a_f / \lg f + b_f, \quad (2.9)$$

де a_f, b_f – константи для конкретної потужності ЛЛ.

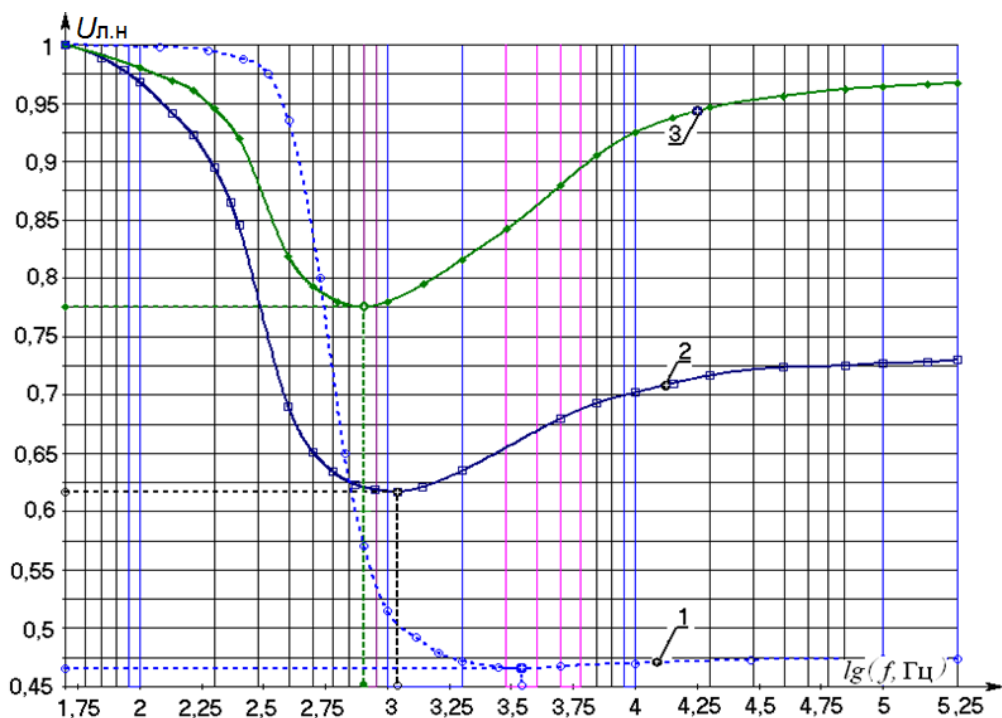


Рис. 2.14. Залежність нормованої напруги на ЛЛ з однаковим внутрішнім діаметром колби ($d_{\text{тр}} = 38$ мм), але різними міжелектродними відстанями (потужностями): 1 – СВК, $l_{\text{ек}} = 11$ см ($P = 8$ Вт); 2 – ЛБ 20, $l_{\text{ек}} = 50,5$ см ($P = 20$ Вт); 3 – ЛБ 40, $l_{\text{ек}} = 112,5$ см ($P = 40$ Вт)

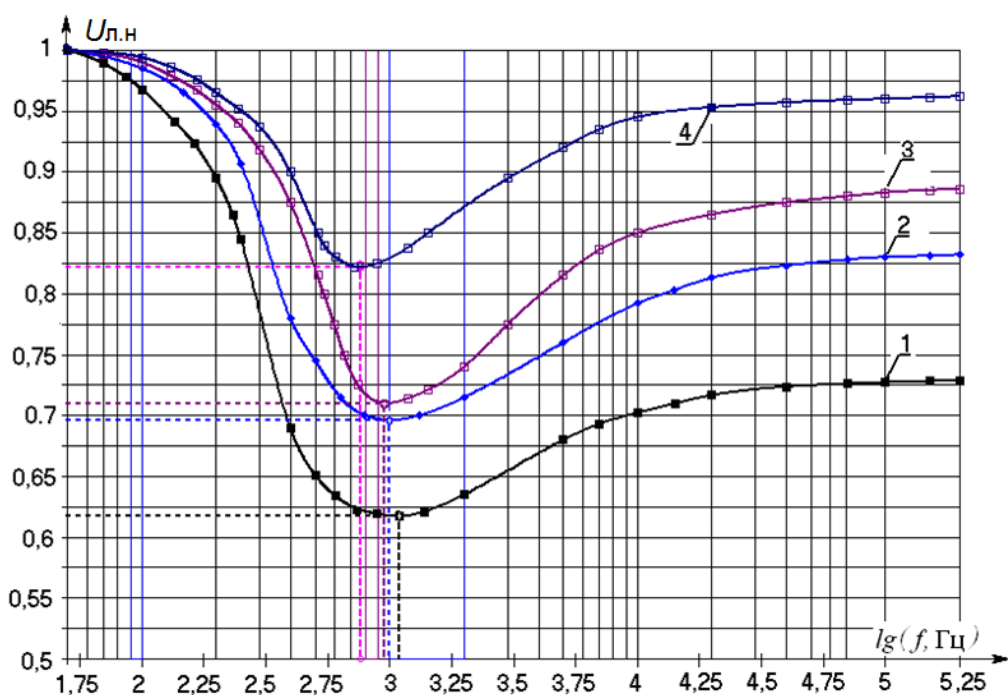


Рис. 2.15. Залежність нормованої напруги на ЛЛ з близькими за значенням між електродними відстанями ($l_{\text{ек}}$), але різними діаметрами колб: 1 – ЛБ 20, $l_{\text{ек}} = 50,5$ см, ($P = 20$ Вт), $d_{\text{тр}} = 38$ мм; 2 – ТЛД 18, $l_{\text{ек}} = 51$ см ($P = 18$ Вт), $d_{\text{тр}} = 26$ мм; 3 – ТЛД 14, $l_{\text{ек}} = 48$ см ($P = 14$ Вт), $d_{\text{тр}} = 16$ мм; 4 – ТЛД 13, $l_{\text{ек}} = 46$ см ($P = 13$ Вт), $d_{\text{тр}} = 7$ мм

Отримані залежності якісно, а не кількісно, аналогічні тим, що опубліковано в роботах [59, 163]. В існуючих літературних джерелах [59, 141] зменшення напруги на лампі з ростом частоти до мінімального значення, при так званій *граничній частоті* f_0 , пояснюється зменшенням анодно-катодного падіння потенціалу, приелектродних втрат та перерозподілом енергії між різними ділянками розряду. Збільшення напруги на лампі на частотах більших граничної пояснюється поступовим зростанням градієнту потенціалу в позитивному стовпі розряду ЛЛ, що пов'язано, згідно з [164], із необхідністю введення додаткової енергії в позитивний стовп розряду для зміни напрямку руху електронів при зміні полярності напруги на лампі.

Ми пропонуємо наступне пояснення цим процесам, виходячи з того, що напруга на лампі $U_{\text{л}}$ визначається сумою чотирьох доданків, а саме

$$U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{ввс}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{пс}} + \Delta U_{\text{а}}, \quad (2.10)$$

де $\Delta U_{\text{ввс}} = I_{\text{л}} \cdot \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 273)] \cdot l_0 / S$;

$$\Delta U_{\text{пс}} = E \cdot l_{\text{пс}};$$

$\Delta U_{\text{к}}$, $\Delta U_{\text{а}}$ – катодне і анодне падіння потенціалу відповідно, В;

$I_{\text{л}}$ – струм лампи, А;

ρ_0 – питомий опір вольфраму при температурі 273 К, Ом·м;

α – температурний коефіцієнт опору вольфраму, $\alpha = (4,8 - 5,3) \cdot 10^{-3}$, 1/К;

T – температура ділянки вольфрамового дроту довжиною l_0 біспіралі електрода, К;

l_0 – довжина вольфрамового дроту біспіралі (триспіралі) від мережевого кінця електрода до катодної плями (КП) (ділянка, з якої оксид розпилювався під час запалювання й випарувався за час світіння ЛЛ), м;

$S = \pi \cdot d^2 / 4$ – площа поперечного перерізу вольфрамового дроту, з якого виготовлений електрод, м²;

d – діаметр вольфрамового дроту електрода, м;

E – градієнт потенціалу позитивного стовпа розряду, В/м;

$l_{\text{пс}}$ – довжина позитивного стовпа розряду, м.

Падіння напруги на відпрацьованих витках спіралей $\Delta U_{\text{ввс}}$ не залишається постійним і поступово зростає (на 400-450 % від початкового значення [165]) по мірі просування КП від мережових до стартерних кінців електродів. Це призводить до поступового зростання активних втрат потужності на електродах ЛЛ (на 23-8 % від потужності ламп), обумовлюючи зменшення світлової віддачі на (20-8) % відповідно.

Катодне падіння потенціалу $\Delta U_{\text{к}}$ також не залишається постійним. Згідно з [166] при збільшенні частоти зменшується не тільки анодне падіння потенціалу $\Delta U_{\text{а}}$, як про це стверджується в [164], але й катодне. При цьому їхні значення майже однакові і в сумі складають близько 10 В.

Припустивши, що залежність анодно-катодного падіння потенціалу й напруги на відпрацьованих витках спіралей від частоти напруги живлення $(\Delta U_{\text{ак}} + U_{\text{ввс}}) = \psi(\lg f)$ для ЛЛ в колбі з внутрішнім діаметром 38 мм є незмінною і такою, як це зображено на рис. 2.16 (крива 1 для СВК), можна визначити закон зміни напруги, яка падає на позитивному стовпі розряду, з виразу

$$U_{\text{пс}} = E \cdot l_{\text{ел}} = U_{\text{л}} - (\Delta U_{\text{ак}} + U_{\text{ввс}}), \quad (2.11)$$

На рис. 2.16 в реальному масштабі побудовані залежності $U_{\text{л}} = \gamma(\lg f)$ для ЛЛ потужністю 20 Вт і 40 Вт, а також залежність $(\Delta U_{\text{ак}} + \Delta U_{\text{ввс}}) = \psi(\lg f)$. Для кожної з ЛЛ згідно з виразом (2.11) побудовані залежності $U_{\text{пс}} = E \cdot l_{\text{ел}} = \chi(\lg f)$.

Як видно з рис. 2.16, закон зміни напруги (градієнту потенціалу) для обох ЛЛ однаковий і в деякій мірі співпадає з аналогічними залежностями, описаними в [50, 164]. З ростом частоти напруги живлення, коли відбувається зростання провідності плазми позитивного стовпа розряду, градієнт потенціалу $(E \cdot l_{\text{ел}})$ спочатку падає повільно, а потім все скоріше, аж поки не стане мінімальним на результуючій частоті f_p . Таким чином, саме завдяки тому, що $(\Delta U_{\text{ак}} + \Delta U_{\text{сп}})$ та

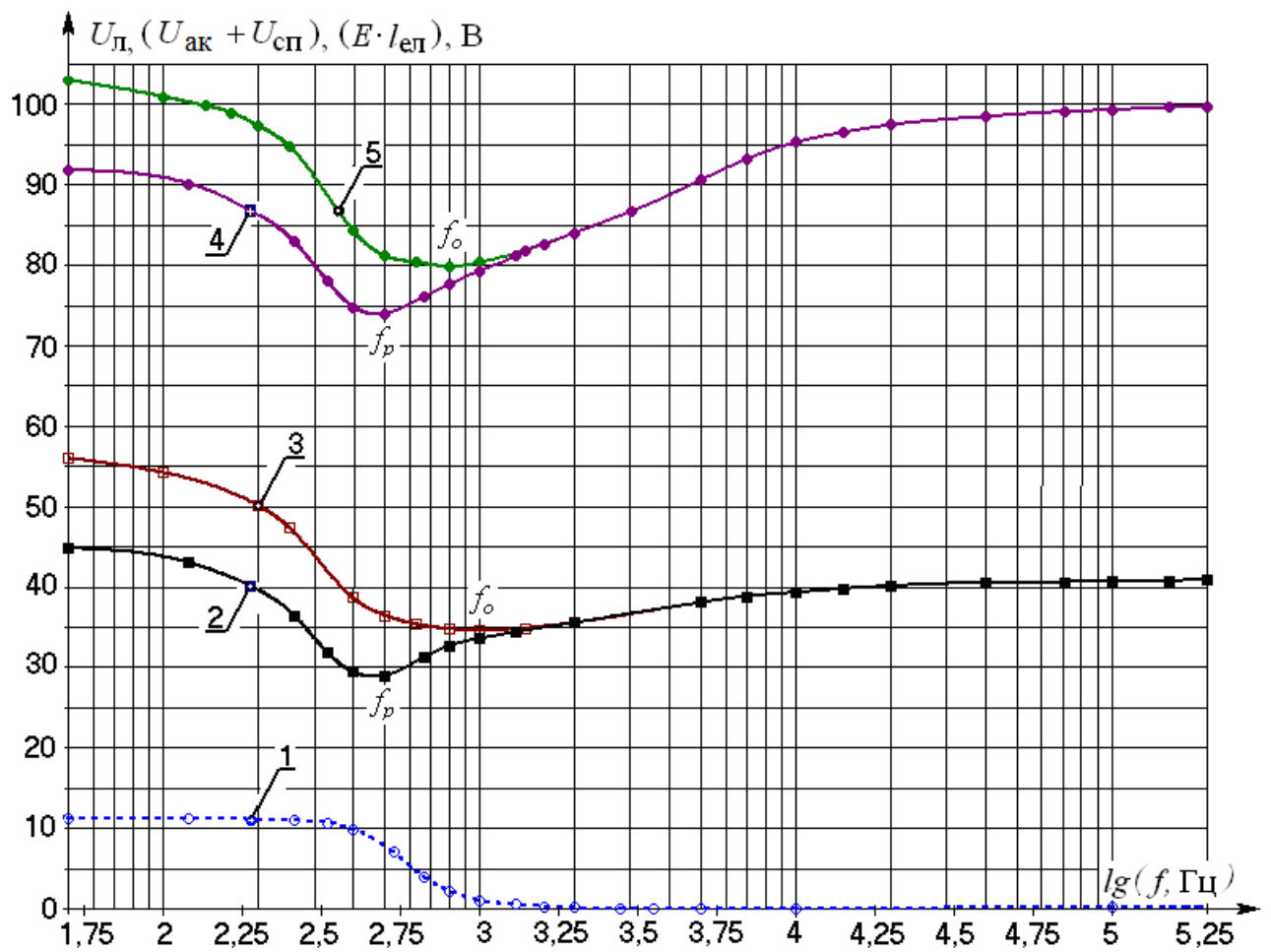


Рис. 2.16. Залежності: 1 – суми анодно-катодного падіння потенціалу і падіння потенціалу на відпрацьованих витках спіралей ($U_{ак} + U_{ввс}$) на СВК з $l_{ел} = 4$ см; 2,4 – падіння потенціалу на позитивному стовпі розряду ($E \cdot l_{ел}$) з мінімумом на результуючій частоті f_p ; 3,5 – напруг на ЛЛ ($U_{л}$) ЛБ 20 та ЛБ 40 з мінімумом на граничній частоті f_o від частоти напруги живлення відповідно

градієнт потенціалу змінюються за різними законами, на залежності $U_{л} = \gamma(\lg f)$ й утворюється мінімум на граничній частоті f_o , який для кожної з потужностей ЛЛ має своє унікальне значення. Так для СВК з $l_{ел} = 11$ см це відбувається при $f_o = 3500$ Гц (рис. 2.16, крива 1). Це не співпадає з твердженням, висловленим в [164] про те, що мінімум напруги на лампі визначається виключно зниженням прианодного падіння потенціалу й спостерігається на частотах, при яких тривалість півперіоду зміни напруги на аноді стає менше характерного часу амбіполярної дифузії τ_D

$$\tau_D = (D_a / \Lambda^2)^{-1} \quad (2.12)$$

де $D_a = k_B \cdot T_e \cdot \mu_i / e$ – коефіцієнт амбіполярної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

T_e – електронна температура плазми, K ;

k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$;

μ_i – рухливість іонів, $\text{м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$;

r , $\Lambda = r / 2,405$ – радіус і дифузійний розмір колби ЛЛ, м .

Якщо б це було саме так, то виходячи з умови про те, що $T / 2 = 1 / (2 \cdot f_0) = \tau_D$, граничну частоту можна було б визначити за формулою

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \tau_D} = \frac{k_B \cdot T_e \cdot \mu_i}{2 \cdot \tau_D} \cdot \frac{5,78}{r^2}. \quad (2.13)$$

При відомих для низькотемпературної плазми розряду низького тиску значеннях $T_e = 10^4 \text{ K}$ і $\mu_i = 0,33 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для основних радіусів розрядних трубок ЛЛ вона дорівнює: а) для $r = 8 \text{ мм}$ $f_0 \approx 1300 \text{ Гц}$; б) для $r = 13,5 \text{ мм}$ $f_0 \approx 450 \text{ Гц}$; в) для $r = 19 \text{ мм}$ $f_0 \approx 230 \text{ Гц}$; г) для $r = 13 \text{ мм}$ $f_0 \approx 115 \text{ Гц}$, що слабо узгоджується з отриманими нами експериментальними даними (рис. 2.14-2.16).

Аналіз експериментальних залежностей $U_{\text{л.н}} = \phi(\lg f)$ (рис. 2.14-2.16) показав, що гранична частота залежить не тільки від діаметру розрядної трубки, який визначає швидкість амбіполярної дифузії і градієнт потенціалу плазми розряду, але й від між електродної відстані ($l_{\text{ел}}$) і струму лампи ($I_{\text{л}}$). Тобто $f_0 = \psi(d_{\text{тр}}(E), l_{\text{ел}}, I_{\text{л}})$.

Із збільшенням відстані між електродами (потужності ЛЛ), при незмінному діаметрі колби, зменшується як значення граничної частоти, так і величина відносного спаду напруги на ЛЛ. Більший відносний спад напруги на лампі на граничній частоті для коротких ЛЛ пояснюється більшою відносною вагою анодно-катодного падіння потенціалу в структурі напруги на лампі. Так для ЛЛ потужністю 13 Вт із $U_{\text{л}} = 95 \text{ В}$ і $\Delta U_{\text{ак}} = 10 \text{ В}$ відносна вага анодно-

катодного падіння становить $\approx 10\%$, в той час як для ЛЛ потужністю 4 Вт з $U_{\text{л}} = 29 \text{ В}$ – це $\approx 30\%$. Таким чином, на підставі вище викладеного ми можемо констатувати наступне:

– діаметр розрядної трубки ЛЛ не є єдиним і визначальним фактором, який впливає на величину граничної частоти;

– у зв'язку з тим, що залежності анодно-катодного падіння й градієнту потенціалу позитивного стовпа розряду від частоти напруги живлення для одного й того ж діаметра трубки ЛЛ є незмінні, їхній відносний вплив на хід залежностей $U_{\text{л.н}} = \phi(\lg f)$ для різних потужностей ЛЛ виявився різним. З ростом потужності (довжини) ЛЛ усе сильніше на хід залежності $U_{\text{л.н}} = \phi(\lg f)$ впливає падіння напруги на позитивному стовпі розряду, обумовлюючи зменшення *граничної частоти* все далі від значення 3500 Гц для $d_{\text{тр}} = 38 \text{ мм}$ (рис. 2.14-2.16). Відносне зменшення напруги на лампі $U_{\text{л.н}}$ з ростом потужності ЛЛ також зменшується від максимального значення $U_{\text{л.н}} = 1 - 0,465 = 0,535$ для СВК з $l_{\text{ел}} = 11 \text{ см}$ до $U_{\text{л.н}} = 1 - 0,775 = 0,225$ на *граничній частоті* для ЛЛ потужністю 40 Вт. Помітний вплив на значення f_0 має і величина струму через лампу. При зменшені (збільшені) струму через лампу зменшується (збільшується) і значення f_0 . Це пояснюється тим, що зі зменшенням (збільшенням) струму зростає (падає) градієнт потенціалу, а значить і вплив падіння напруги на позитивному стовпі розряду на хід залежності $U_{\text{л}} = \gamma(\lg f)$. Чим менше величина струму, тим менше значення граничної частоти (рис. 2.17). При цьому гранична частота не може бути менше деякого критичного значення, характерного для даного діаметра колби ЛЛ (для ЛЛ у колбі з внутрішнім діаметром 38 мм це 500 Гц).

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що значення граничної частоти залежить в основному від падіння напруги на позитивному стовпі розряду $U_{\text{пс}} = E(I_{\text{л}}) \cdot l_{\text{пс}}$, де $l_{\text{пс}}$ прийнята рівною відстані між електродами $l_{\text{пс}} = l_{\text{ел}}$, як це характерно при роботі ЛЛ на високих частотах, $E(I_{\text{л}})$ –

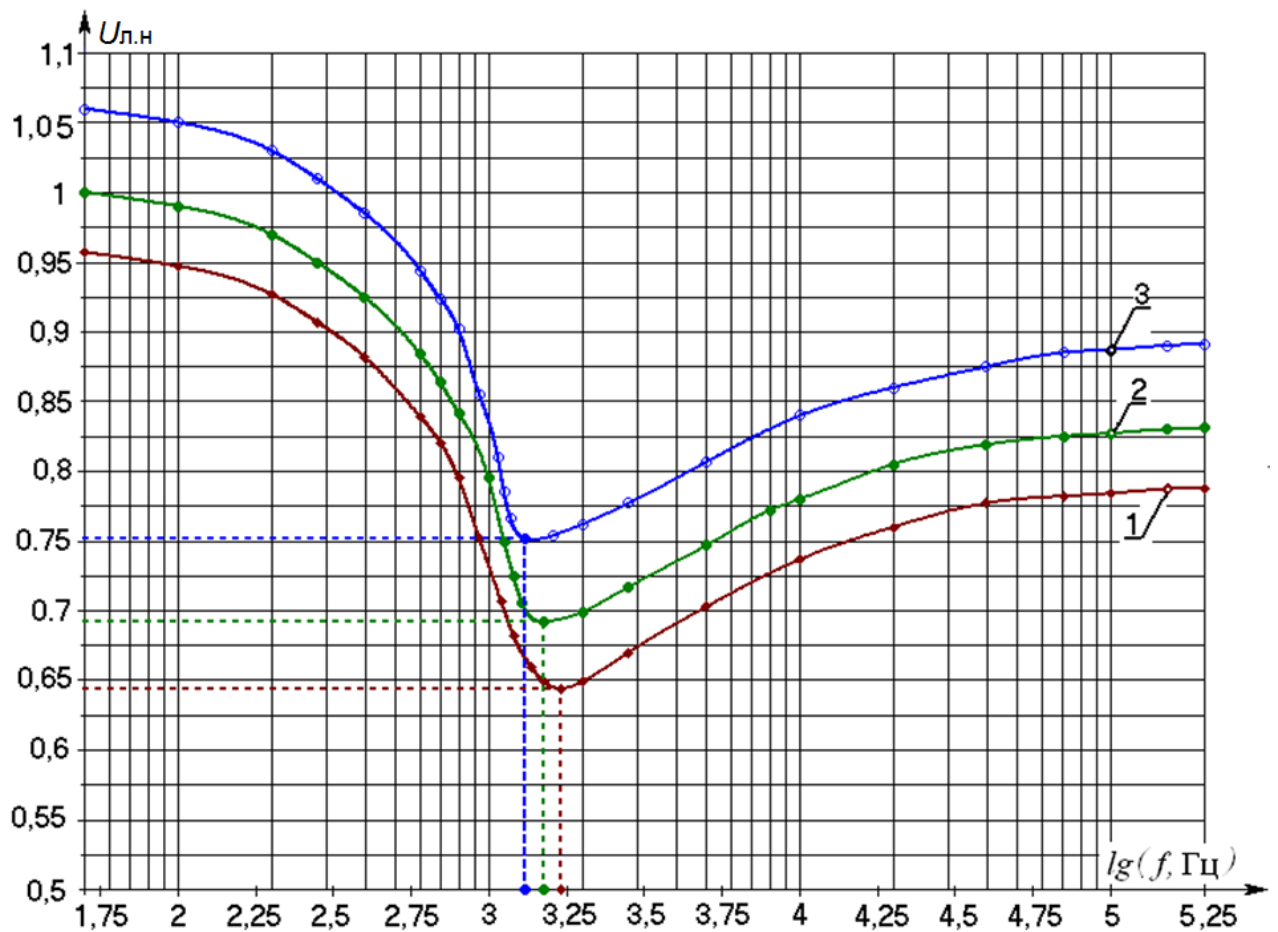


Рис. 2.17. Залежність нормованої напруги на ЛЛ потужністю 8 Вт від частоти напруги живлення при різних струмах лампи: 1 – на 30 % більше номінального $1,3 \cdot I_{\text{л.ном}}$; 2 – номінальному; 3 – на 30 % менше номінального $0,7 \cdot I_{\text{л.ном}}$.

градієнт потенціалу позитивного стовпа розряду на частоті 50 Гц, який в свою чергу залежить від величини струму і діаметра лампи.

Значення градієнту потенціалу для різних внутрішніх діаметрів розрядних трубок ($d_{\text{тр}}$, в мм), через які протікають струми ($I_{\text{л}}$, в А) рівні номінальним для стандартного ряду потужностей ЛЛ визначалися нами за формулою (2.14), виведеною на основі експериментальних досліджень і даних, наведених у [110]

$$E = b(I) \cdot d_{\text{тр}}^{k(I)}, \text{ В/см}, \quad (2.14)$$

де $k(I) = 0,206 \cdot I_{\text{л.н}}^3 - 0,8 \cdot I_{\text{л.н}}^2 + 0,7 \cdot I_{\text{л.н}} - 0,58$;

$$b(I) = -9,26 \cdot I_{\text{л.н}}^3 + 26,07 \cdot I_{\text{л.н}}^2 - 22,9 \cdot I_{\text{л.н}} + 9,29.$$

Формула (2.14) дозволяє з достатньою для практики точністю визначати градієнт потенціалу плазми розряду й будувати його залежності від струму для ЛЛ з діаметром розрядних трубок від 7 до 54 мм в діапазоні струмів від 0,1 до 1,0 А для частоти 50 Гц.

Формула (2.14) була використана при побудові графіку, зображеному на рис. 2.18, і формуванні даних табл. 2.9 для наступних найбільш розповсюджених діаметрів колб ЛЛ: 7 мм, 16 мм, 26 мм та 38 мм. З рис. 2.18 і табл. 2.9 видно, що для ЛЛ однакового діаметру зростання струму через лампу призводить до падіння градієнта потенціалу і напруги на позитивному стовпі розряду. Значення граничної f_0 частоти при цьому зростає. Тобто між f_0 і $E(I_{\text{л}}) \cdot l_{\text{ел}}$ існує зворотно пропорційна залежність, яка добре описується наступним аналітичним виразом

$$f_0 = 31,6 / (E(I_{\text{л}}) \cdot l_{\text{ел}}) + 0,48, \text{ кГц.} \quad (2.15)$$

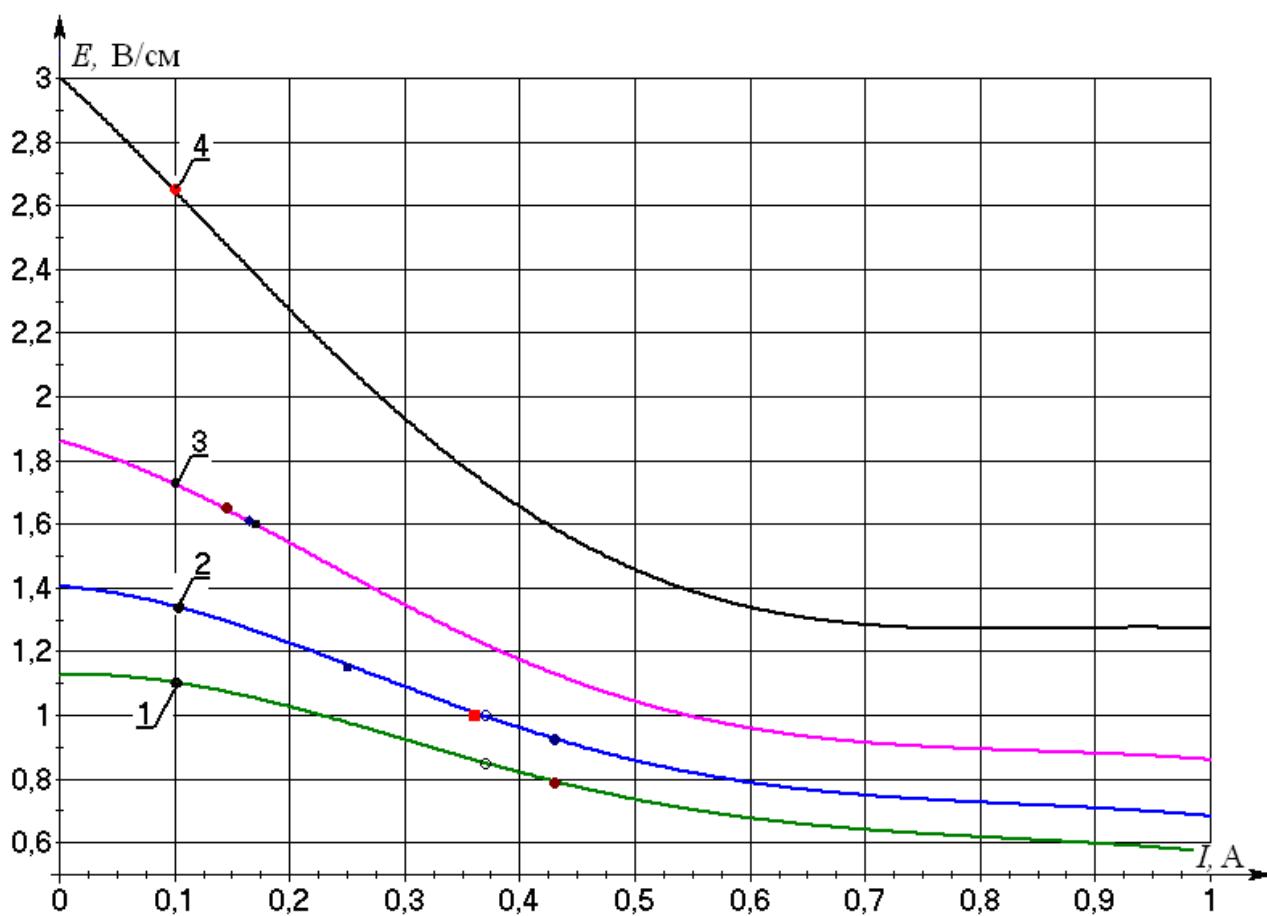


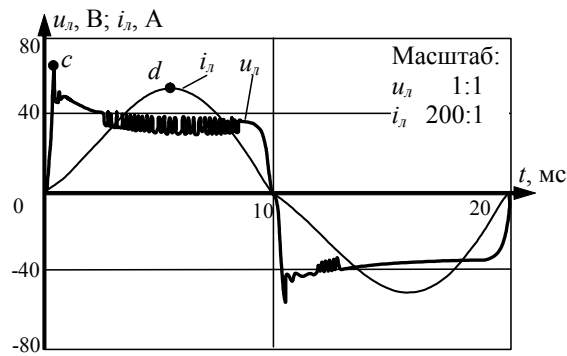
Рис. 2.18. Залежність градієнта потенціалу позитивного стовпа розряду ЛЛ в мережі промислової частоти від струму для різних внутрішніх діаметрів колб: 1 – 38 мм; 2 – 26 мм; 3 – 16 мм; 4 – 7 мм

Таблиця 2.9

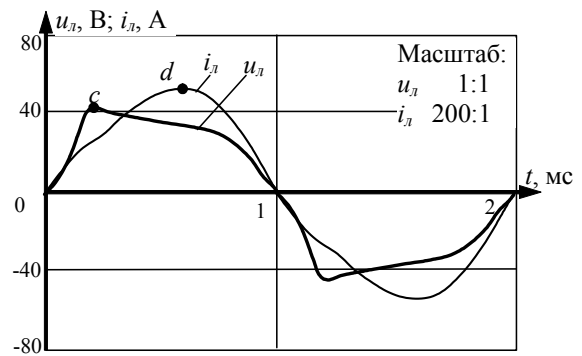
Геометричні, електричні та безрозмірні параметри люмінесцентних ламп

Тип і $P_{\text{л}},$ Вт	$U_{\text{л}},$ В	$I_{\text{л.ном}},$ А	$d_{\text{тр.}},$ мм	$l_{\text{ел}},$ см	$E,$ В/см	$E \times l_{\text{ел}},$ В	$\Delta U_{\text{ак}},$ В	$f_o,$ Гц	$\frac{U_{\text{л}}}{U_{\text{м}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TLD13	136	0,100	7 (T2)	46,0	2,80	129	7,00	720	0,62
ЛБ 4	29	0,170	16 (T5)	8,5	1,60	13,60	11,40	2800	0,23
ЛБ 8	52	0,145	16 (T5)	23,5	1,65	37,80	14,20	1500	0,41
ЛБ 13	92	0,165	16 (T5)	46,0	1,61	74,00	18,00	950	0,43
TLD14	86	0,165	16 (T5)	48,0	1,61	77,00	9,00	890	0,39
TLD28	166	0,170	16 (T5)	107,5	1,45	156,00	10,00	680	0,75
ЛБ15	52	0,310	26 (T8)	35,5	1,06	37,63	14,37	1200	0,41
ЛЕ 20	80	0,250	26 (T8)	51,0	1,14	58,14	21,86	1000	0,79
ЛБ 30	95	0,360	26 (T8)	79,0	1,01	79,79	15,21	900	0,43
TLD18	59	0,360	26 (T8)	50,0	1,01	50,50	8,50	1100	0,46
TLD36	104	0,440	26 (T8)	112,5	0,85	95,00	9,00	810	0,47
ЛБ 20	57	0,370	38(T12)	50,5	0,85	43,0	21,17	1200	0,45
ЛБ 40	103	0,430	38 T12)	112,5	0,79	89,00	23,17	800	0,47
СВК	25	0,340	38 T12)	11,0	0,88	9,68	14,55	3500	0,44

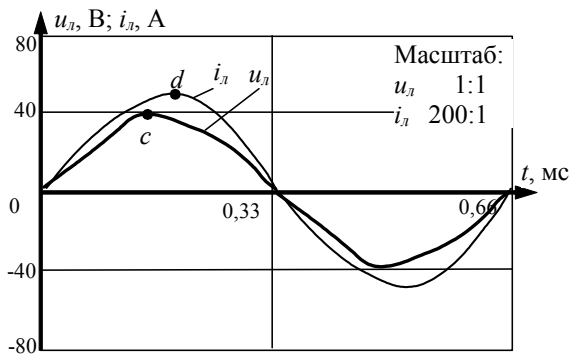
У процесі дослідження частотних залежностей осцилограм миттєвих напруг і струмів ЛЛ різних потужностей було також встановлено, що після 500 Гц (рис. 2.19,б) зникають анодні релаксаційні коливання з амплітудою до 12 В, які виникають на додатних півхвилях осцилограм напруг на ЛЛ ($u_{\text{л}}$) (рис. 2.19,а), підсилюючи пульсації світлового потоку на промисловій частоті. А після досягнення граничної частоти повністю зникає і пік напруги перезапалювання розряду (т. с на рис. 2.19 ,а, б, в, г). Форми кривих напруги на лампі й струму через лампу стають плавними.



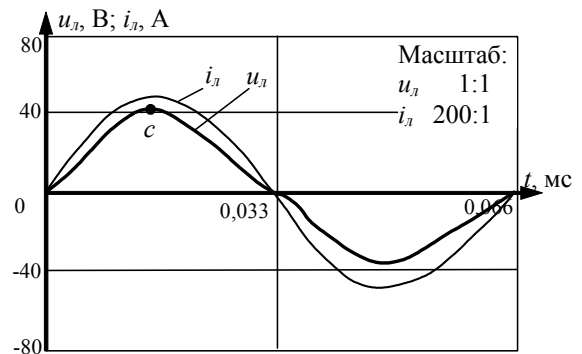
а) 50 Гц



б) 500 Гц



в) 1 500 Гц



г) 15 000 Гц

Рис. 2.19. Осцилограми струмів та напруг ЛЛ потужністю 6 Вт (в колбі з внутрішнім діаметром 16 мм) в колі з дроселем при номінальному струмі лампи і різних частотах напруги живлення

Щодо приросту світлової віддачі ($\Delta H_{\text{вч}}$) на високих частотах ($f \geq 40$ кГц). Встановлено, що найбільші його значення притаманні коротким (малопотужним) ЛЛ (рис. 2.20, крива 1). При цьому чим менше внутрішній діаметр колби ЛЛ, тим менше приріст. Так для потужності ЛЛ 20 Вт в колбі діаметром $d_{\text{тр}} = 16$ мм (рис. 2.20) приріст становить 10 %, діаметром 26 мм – 20 %, а діаметром 38 мм – 23 %. При зменшенні довжини (потужності) ЛЛ ці відмінності поступово зникають. Так для ЛЛ потужністю 10 Вт приріст світлової віддачі як для ламп в колбі 38 мм, так і для ламп в колбі 26 мм абсолютно однаковий і становить $\Delta H_{\text{вч}} = 30$ %.

Слід також зазначити, що чим менше діаметр колби ЛЛ, тим скоріше зникають переваги високочастотного живлення з ростом потужності лампи. Так у ЛЛ з діаметром колби 16 мм приріст світлової віддачі для потужностей

більших за 35 Вт дорівнює нулю. У супертонких ЛЛ ($d_{\text{тр}} = 7$ мм) приріст світлової віддачі відсутній для всіх потужностей.

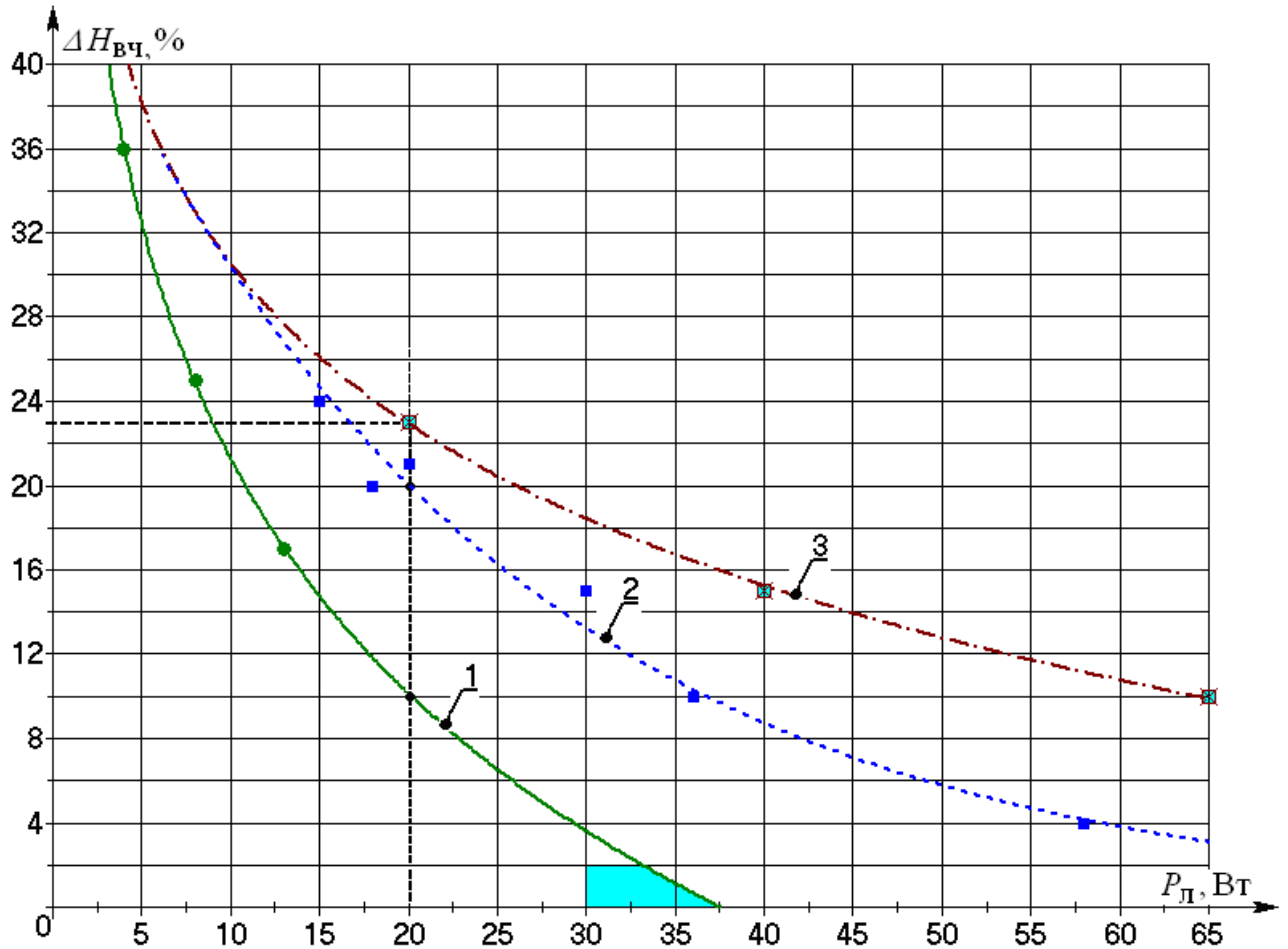


Рис. 2.20. Залежність приросту світлової віддачі ЛЛ на високих частотах ($f_{\text{м}} \geq 40$ кГц) від потужності і діаметра колби: 1 – $d_{\text{тр}} = 16$ мм; 2 – $d_{\text{тр}} = 26$ мм; 3 – $d_{\text{тр}} = 38$ мм

Одночасне зменшення діаметру й струму призводить до суттєвого зростання градієнту потенціалу (рис. 2.18 крива 4), обмежуючи можливості виготовлення потужних ЛЛ за рахунок суттєвого зростання напруги на них. Так напруга на тонкій ($d_{\text{тр}} = 16$ мм) ЛЛ TLD 28 ($I_{\text{л}} = 0,165$ А) становить $U_{\text{л.ном}} = 166$ В, а відносне її значення $m = U_{\text{л.ном}} / U_{\text{м}} = 0,75$ (TLD 35, $I_{\text{л}} = 0,175$ А – $U_{\text{л.ном}} = 205$ В, $m = 0,93$) перевищує максимально допустиме значення ($0,32 \leq m \leq 0,65$), обумовлюючи необхідність виготовлення спеціальних електронних пускорегулювальних апаратів. Саме тому потужність супертонких ЛЛ обмежена 13 Вт ($I_{\text{л}} = 0,1$ А, $U_{\text{л.ном}} = 136$ В, $l_{\text{л}} = 52,3$ см).

2.4. Висновки з розділу 2

1. Установлено, що номінальна світлова віддача з ростом номінальної потужності джерел світла змінюється за гіперболічним законом. Для більшості ДС ця залежність зростаюча і лише для трьох, абсолютно різних за фізичними принципами дії (трубчастих ЛР Special Linestra, безелектродних ЛЛ типу ENDURA та метало-галогенних ламп високого тиску з керамічними пальниками типу POWER-BALL HCI-T) – падаюча. Це вказує на те, що отримані величини світлових віддач для трубчастих ЛР Special Linestra і метало-галогенних ламп високого тиску з керамічними пальниками типу POWER-BALL HCI-T є граничними і при збільшенні потужності змінюватися не будуть, а у безелектродних ЛЛ типу ENDURA, у яких розряд збуджується за рахунок змін магнітного поля, будь-яке збільшення потужності призведе до падіння світлової віддачі. Останнє вказує на безперспективність освоєння виробництва потужних ламп такого типу.

2. Отримано аналітичні вирази для функціональних залежностей номінальних світлових віддач від номінальних потужностей для всієї гами існуючих джерел світла. З'ясувалося, що для ДС із зростаючою залежністю номінальних світлових віддач від номінальних потужностей перший доданок, із знаком мінус, визначає швидкість зростання, а другий – максимальне значення номінальної світлової віддачі ДС даного типу. Для ДС з аналогічною падаючою залежністю все навпаки. Чим більше відношення чисельника першого доданку до другого в отриманих математичних залежностях, тим більшою є вірогідність зміни світлових віддач джерел світла при збільшенні їхньої номінальної потужності.

3. Запропоновано методику для визначення конкретних значень можливих змін номінальних світлових віддач (зростання або спадання) при зростанні номінальної потужності джерел світла.

4. Доведено, що світлові віддачі не білих джерел світла (а у невеликих межах до (440 – 660 нм) і білих зростають при симетричному звуженні діапа-

зону електромагнітних випромінювань у видимій області спектру відносно значення максимуму кривої видності. Реально досяжні значення світлових віддач джерел білого світла з високим індексом кольоропередачі ($R_a \geq 93$) знаходяться в межах 118-131 лм/Вт.

5. Отримано аналітичні вирази для визначення світлових віддач джерел білого світла для вибраного діапазону електромагнітних випромінювань у видимій області спектру для денного і нічного зору, що дає можливість визначати візуальну ефективність ДС за значенням S/P-фактора.

6. Отримано аналітичний вираз, який дозволяє з достатньою для практики точністю визначати градієнт потенціалу плазми розряду й будувати його залежності від струму для люмінесцентних ламп з внутрішнім діаметром розрядних трубок від 7 мм до 54 мм в діапазоні струмів від 0,1 до 1,0 А.

7. Наочно доведено, що релаксаційні анодні коливання з амплітудою до 12 В, які виникають на додатних півхвилях осцилограм напруг на люмінесцентних лампах, підсилюючи пульсації світлового потоку в колах промислової частоти, остаточно зникають на частотах більших за 500 Гц, а після досягнення граничної частоти повністю зникають не тільки піки перезапалювання розряду, але й форми осцилограм напруги на лампі та струму через ЛЛ наближаються до синусоїдальних.

8. Встановлено зворотно пропорційний зв'язок між граничною частотою f_o й падінням напруги на позитивному стовпі розряду ($E(I_{\text{л}}) \cdot l_{\text{ел}}$) люмінесцентних ламп, що дало можливість отримати аналітичний вираз для її визначення.

9. Доведено, що одночасне зменшення діаметру розрядної трубки й струму через лампу призводить до суттєвого зростання градієнту потенціалу в позитивному стовпі розряду (відносних значень напруг на ЛЛ), обмежуючи можливість виготовлення потужних (довгих) ЛЛ для електричних мереж промислової частоти напругою 220-230 В.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В СТАЦІОНАРНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

3.1. Динаміка світлового потоку джерел світла в процесі експлуатації протягом середньої тривалості світіння

В процесі експлуатації джерел світла відбувається поступове зменшення світлового потоку. У розрядних ламп високого і низького тиску особливо інтенсивно цей процес протікає в перші 100 годин світіння, коли відбувається доактивування катодів, виділення та поглинання різного роду домішків. Надалі швидкість падіння світлового потоку поступово уповільнюється [50]. У ТДС падіння світлового потоку в процесі експлуатації пов'язують лише із зменшенням діаметра тіла розжарювання і розпиленням вольфраму [167]. У напівпровідникових ДС – виключно з температурою p - n переходу.

Незалежно від причин, які обумовлюють падіння світлового потоку в процесі експлуатації, його значення після середньої тривалості світіння повинно бути не менше 70 % (в деяких випадках 50 %) номінальних величин, зазначених в нормативно-технічній документації. В теперішній час найменша величина спаду світлового потоку протягом СТС у сучасних ЛЛ не перевищує 5 %, а у безелектродних – 50 %. В більшості випадків при розрахунках ОУ спад світлового потоку враховують введенням коефіцієнту запасу [58, 168].

Якщо в основу оцінювання енергоефективності ОУ покласти світлову енергію, то для визначення її кількості за певний період часу (в тому числі і за СТС) треба знати аналітичні залежності динаміки світлового потоку ДС в процесі експлуатації. Аналіз існуючих та власних результатів досліджень [44, 144, 145, 169] показав, що ці залежності, у разі якщо вони нормовані, для всіх типів ДС ідентичні і мають вигляд, наведений на рис. 3.1. Різним для кривих рис. 3.1 є тільки кінцева величина спаду світлового потоку ΔF_n . Враховуючи те, що кількість світлової енергії, генерованої ДС за певний проміжок часу, дорівнює

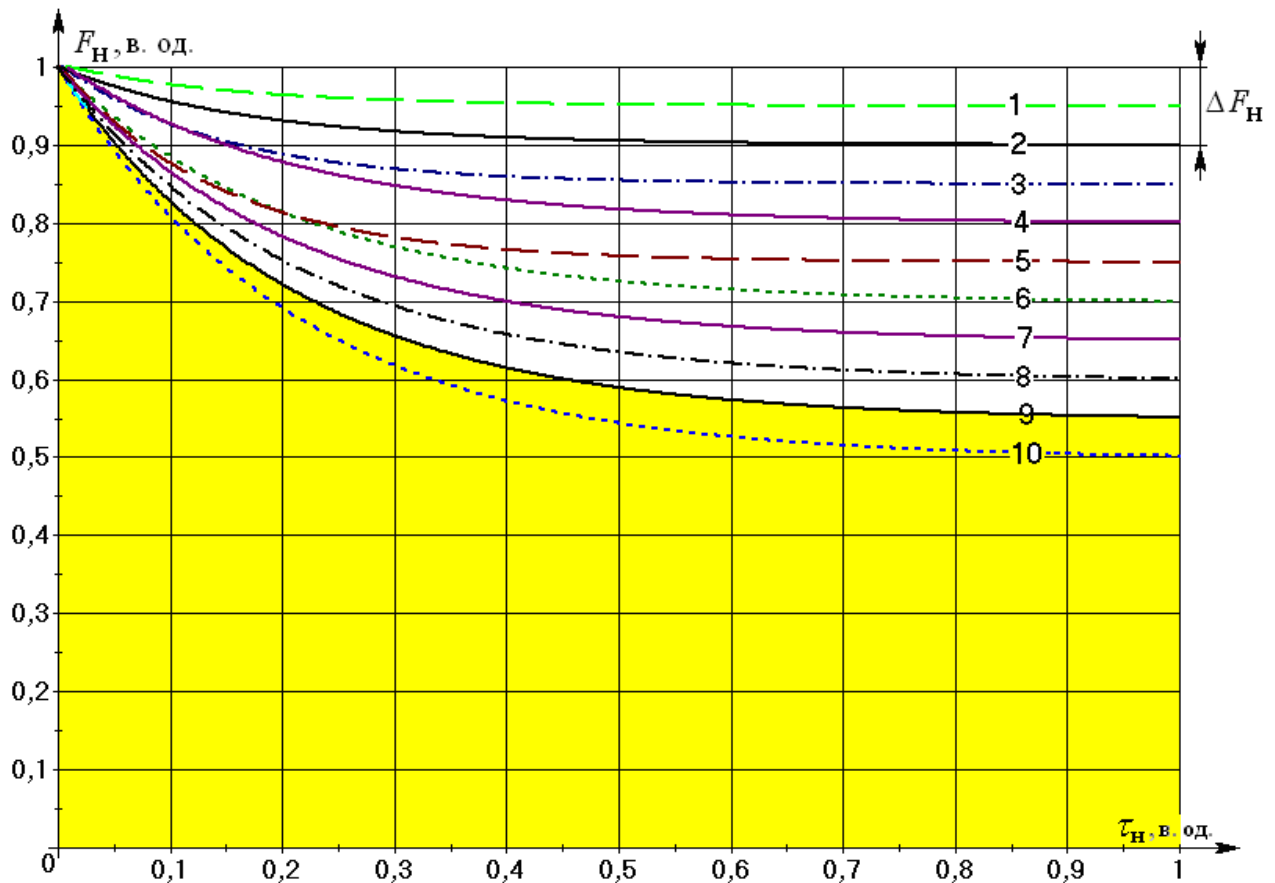


Рис. 3.1. Динаміка нормованого світлового потоку джерел світла в процесі експлуатації протягом СТС

добутку величини світлового потоку на час експлуатації, протягом якого він випромінювався, це буде площа під кривою динаміки світлового потоку в процесі експлуатації (на рис. 3.1 для випадку 55 % спаду світлового джерела світла протягом номінальної СТС ця площа виділена сірим).

Для визначення величини цієї площі за формулою (3.1) повинні бути відомі функціональні залежності динаміки світлового потоку в процесі експлуатації ДС протягом СТС

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

де $F(t)$ – функціональна залежність динаміки світлового потоку в процесі експлуатації ДС протягом СТС;

$Q_{\text{ДС}}$ – світлова енергія, генерована джерелом світла за СТС, Млм×год;

$\tau_{\text{ном}}$ – номінальна середня тривалість світіння ДС, год.

Відомі графічні залежності, наведені в [44, 144, 145, 169], для різних типів ДС апроксимувалися поліномами третьої степені, показниковими та експоненціальними функціями. Наші дослідження показали, що при переході до нормованих значень динаміка перехідного процесу світлового потоку джерел світла в процесі експлуатації визначається кінцевою величиною нормованого спаду світлового потоку ΔF_n і незалежно від типу ДС добре описується сукупністю сталої величини, яка дорівнює значенню нормованого номінального світлового потоку в кінці СТС і різницею падаючої (другий доданок у виразі (3.2)) і зростаючої (третій доданок у виразі (3.2)) вільних складових – експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування

$$F_n(t_n) = (F_{n,ном} - \Delta F_n) + \Delta F_n \cdot \exp(-t_n / \tau_1) - \Delta F_{n2} \cdot (1 - \exp(-t_n / \tau_2)), \quad (3.2)$$

де $F_n(t_n)$ – нормований світловий потік ДС;

$F_{n,ном}$ – нормований номінальний світловий потік ДС ($F_{n,ном} = 1$);

ΔF_n – нормований спад світлового потоку в кінці СТС джерел світла згідно із стандартом LM-80 ($\Delta F_n = 0,05 - 0,50$);

ΔF_{n2} – нормований світловий потік другої складової перехідного процесу падіння світлового потоку ДС протягом СТС від моменту початку експлуатації;

t_n – нормований час;

τ_1, τ_2 – сталі часу складових перехідного процесу.

При такому підході конкретні вирази для різних кінцевих нормованих величин спаду світлового потоку ΔF_n (від 0,05 до 0,50) для будь-якого ДС мають наступний вигляд

$$F_n(t_n) = 0,95 + 0,05 \cdot \exp(-t_n / 0,154) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_n / 2)), \quad (3.3)$$

$$F_n(t_n) = 0,90 + 0,10 \cdot \exp(-t_n / 0,164) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_n / 2)), \quad (3.4)$$

$$F_n(t_n) = 0,85 + 0,15 \cdot \exp(-t_n / 0,145) - 0,002 \cdot (1 - \exp(-t_n / 0,2)), \quad (3.5)$$

$$F_n(t_n) = 0,80 + 0,20 \cdot \exp(-t_n / 0,21) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_n / 2)), \quad (3.6)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,75 + 0,25 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,145) - 0,002 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,2)), \quad (3.7)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,70 + 0,30 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,003 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 2)), \quad (3.8)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,65 + 0,35 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)), \quad (3.9)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,60 + 0,40 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)), \quad (3.10)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,55 + 0,45 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)), \quad (3.11)$$

$$F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) = 0,50 + 0,50 \cdot \exp(-t_{\text{н}} / 0,21) - 0,0025 \cdot (1 - \exp(-t_{\text{н}} / 0,135)). \quad (3.12)$$

Вирази (3.3 – 3.12) дають можливість визначати нормовані значення світлової енергії $Q_{\text{н,дс}}$, генерованої ДС за СТС, для різних кінцевих величин нормованого спаду світлового потоку $\Delta F_{\text{н}}$ за формулою

$$Q_{\text{н,дс}} = \int_0^1 F_{\text{н}}(t_{\text{н}}) dt_{\text{н}}, \text{ в. од.} \quad (3.13)$$

Для переходу до натуральних фізичних величин необхідно нормовані значення світлових енергій помножити на добуток номінальних значень СТС (в год) і світлового потоку (в Млм), розглядуваного ДС. Похибка розрахунків при такому підході не перевищує 8 %.

3.2. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку теплових джерел світла при зміні номінальної світлової віддачі та димеруванні

Вимірювання коефіцієнта пульсацій світлового потоку в процесі досліджень проводилися в мережі промислової частоти ($f = 50 \text{ Гц}$) за допомогою приладу комбінованого «ТКА-ПКМ» (08), який дозволяє вимірювати освітленість в межах від 10 до 200 000 лк з похибкою до 8 % та пульсації світлового потоку з похибкою до 10 %. Для забезпечення відтворюваності дослідів кількість ТДС кожного типу, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною п'яти [162]. Результати оброблених результатів досліджень наведено на рис. 3.2.

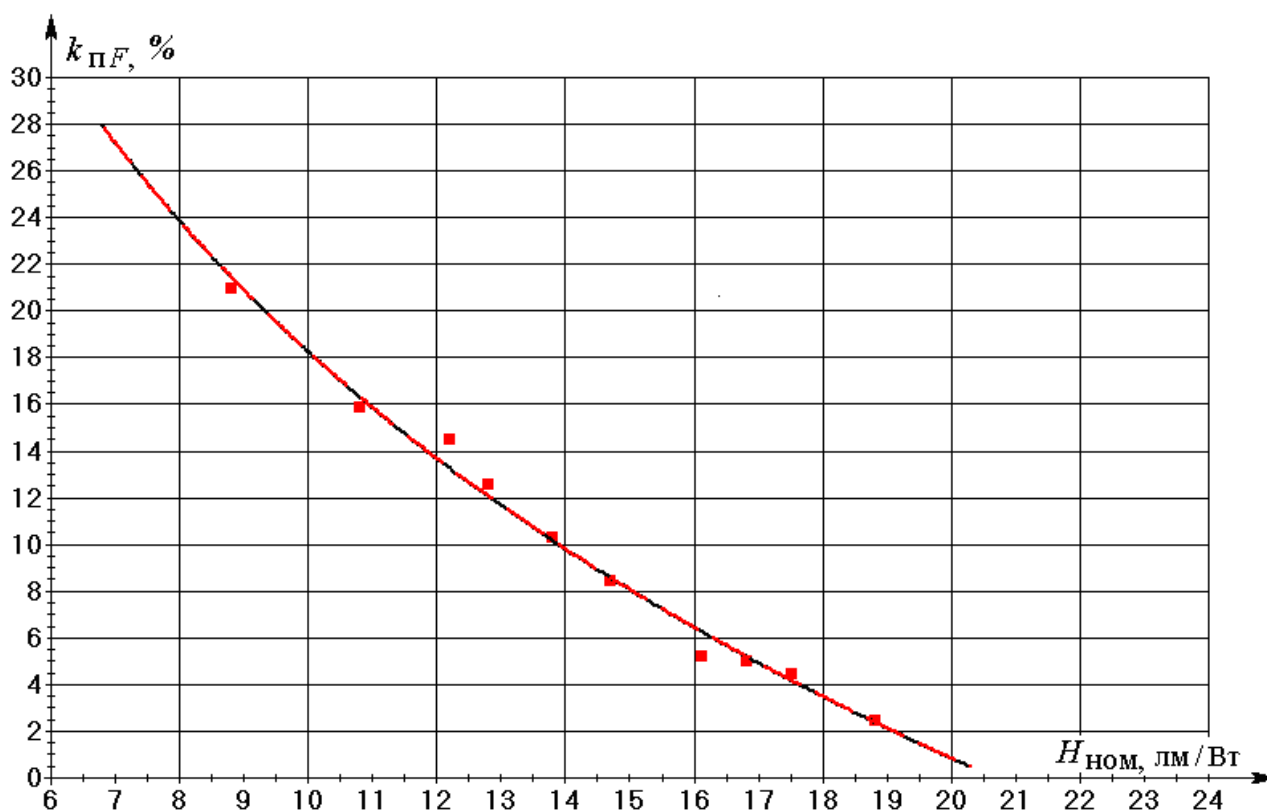


Рис. 3.2. Динаміка коефіцієнта пульсації світлового потоку при зростанні номінальної світлової віддачі ТДС (ЛР і КГЛР)

Аналіз рис. 3.2 показав, що при збільшенні світлової віддачі коефіцієнт пульсації світлового потоку зменшується за наступним логарифмічним законом $k_{пF} = -25,14 \cdot \ln(H_{л.ном}) + 76,14$, % (при стандартному відхиленні 0,63 і коефіцієнті кореляції $R^2 = 0,99$) і не залежить від типу ТДС. Для найменшої світлової віддачі $H_{л.ном} = 6,7$ лм/Вт ($P_{л.ном} = 15$ Вт) він не перевищує 28 %, а для найбільш розповсюдженої 100 Вт ЛР ($H_{л.ном} = 13,8$ лм/Вт) – 10 %.

Дослідження динаміки нормованого коефіцієнта пульсацій світлового потоку ТДС проводилося нами в процесі зменшення напруги живлення за допомогою ЛАТРа і симісторного регулятора потужності промислового виробництва «VIKO» 600 W/1000 W ROTATIVE DIMMER, підтвердженого стандартом ISO 9001. Вимірювання проводилися в мережі промислової частоти і в схемі однопівперіодного випрямлення (ОПВ). За номінальні значення $k_{пF}$ в схемі ОПВ були прийняті наступні дані: для ЛР 25 Вт – $k_{пF} = 52$ %; 40 Вт – $k_{пF} = 49$ %;

100 Вт – $k_{пF} = 32\%$; 300 Вт – $k_{пF} = 15\%$). За даними оброблених результатів вимірювань були побудовані графіки, наведені на рис. 3.3.

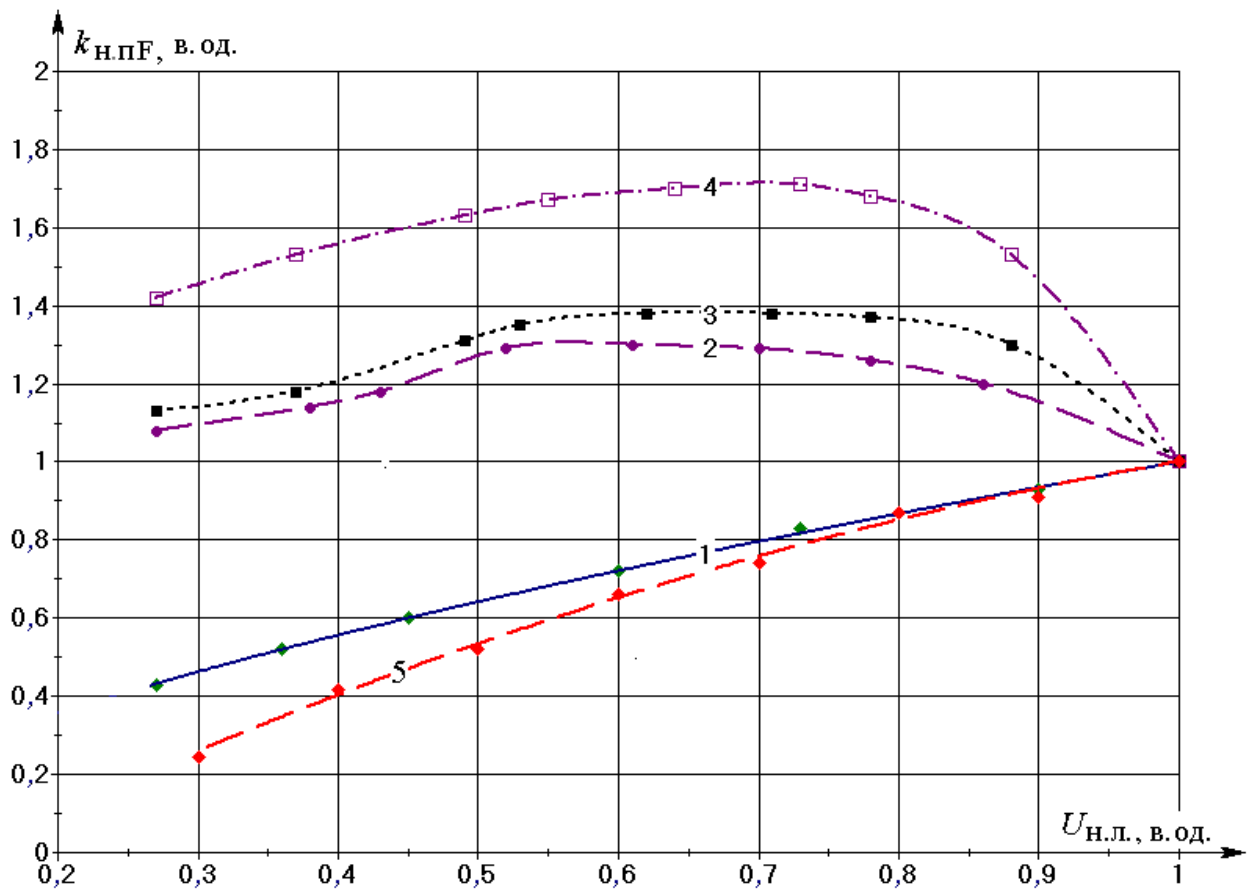


Рис. 3.3. Динаміка нормованого коефіцієнта пульсацій світлового потоку ЛР при димеруванні: 1 – ЛАТРоМ, для потужностей 25-1000 Вт; 2, 3, 4 – симісторним регулятором, для потужностей: 2 – 40 Вт, 3 – 100 Вт, 4 – 300 Вт; 5 – в схемі ОПВ

Аналіз отриманих результатів показав, що при димеруванні за допомогою ЛАТРа нормований коефіцієнт пульсації світлового потоку зменшується за наступним степеневим законом $k_{н.пF} = U_{н.л.}^{0,64}$, а в схемі ОПВ – $k_{н.пF} = -0,624 \cdot U_{н.л.}^2 + 1,87 \cdot U_{н.л.} - 0,246$. При димеруванні за допомогою симісторного регулятора коефіцієнт пульсації зростає досягаючи максимальних значень на ділянці 0,65-0,75 нормованої напруги мережі. При цьому максимальні значення зростають з ростом потужності ТДС.

3.3. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку по довжині кольорових і з різною колірною температурою люмінесцентних ламп

Для визначення якості освітлення з точки зору величини коефіцієнта пульсацій світлового потоку нами були проведені відповідні дослідження з кольоровими (червоними, жовтими, зеленими і синіми) та з різними колірними температурами (2700 К, 4000 К, 6500 К) ЛЛ фірми PHILIPS. Дослідження проводилися в мережі промислової частоти ($f = 50 \text{ Гц}$) в схемі з індуктивним баластним дроселем при стабілізованій напрузі мережі ($230 \text{ В} \pm 3 \text{ В}$), виключно з номінальними ЛЛ [170] при температурі оточуючого середовища $18\text{-}25^\circ\text{C}$ і відносній вологості не більше 70 %. Для забезпечення відтворюваності дослідів кількість ЛЛ кожного типу, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною п'яти [162]. Вимірювання проводилися приладом комбінованим «ТКА-ПКМ» (08), описаним в п.3.2. Результати оброблених результатів досліджень наведено на рис. 3.4.

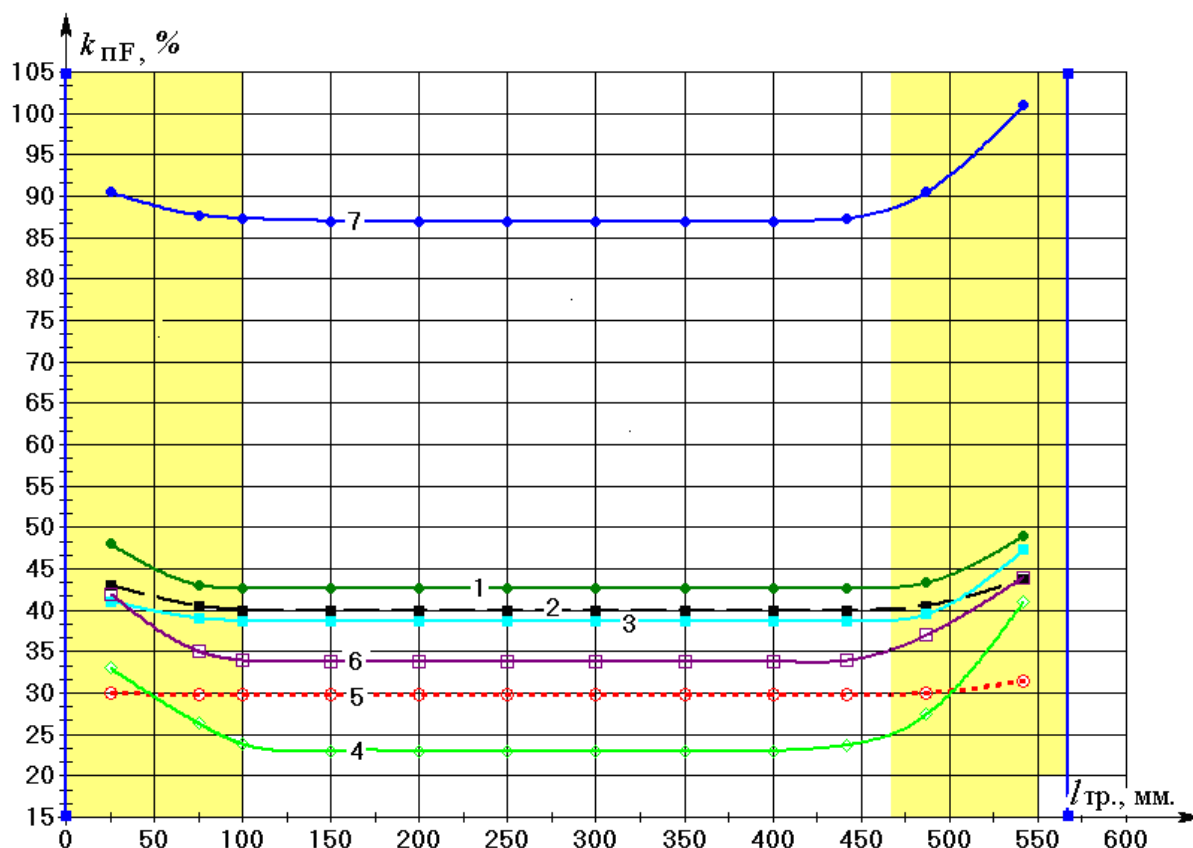
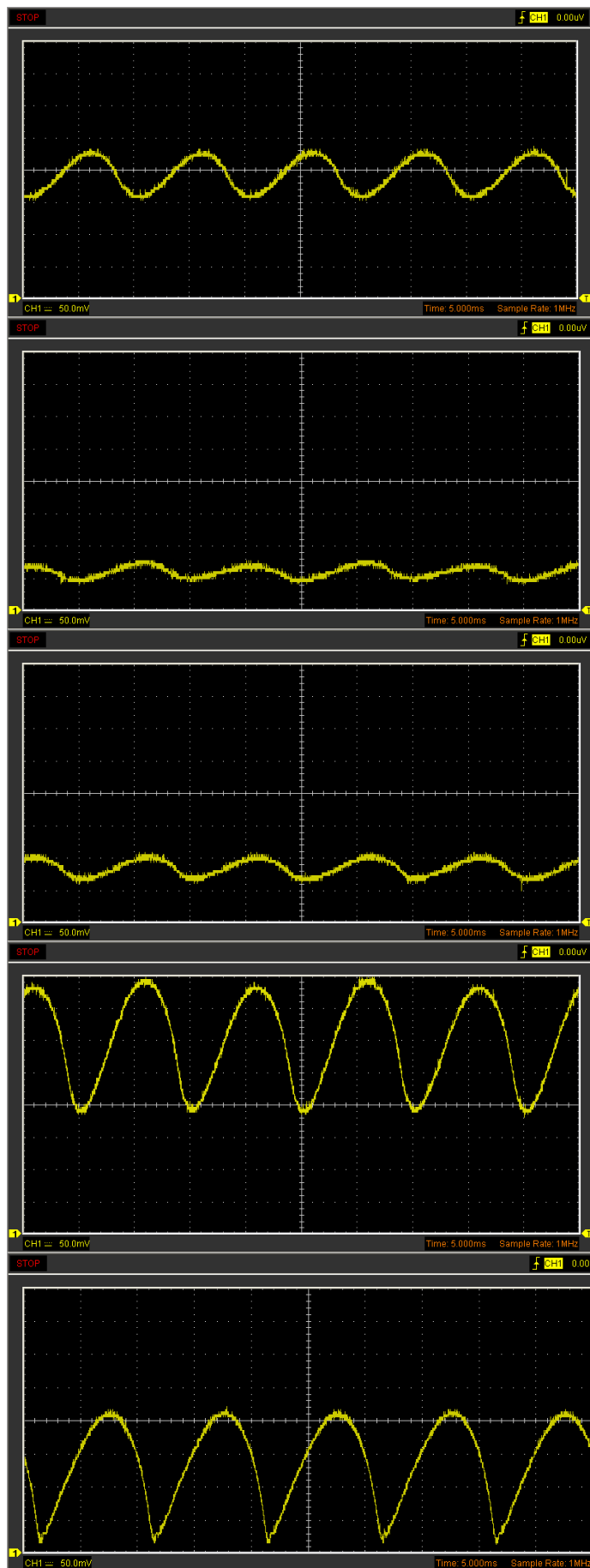


Рис. 3.4. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку по довжині кольорових і з різною колірною температурою ЛЛ TLD 18 Вт (PHILIPS): 1 – $T_k = 2700 \text{ К}$; 2 – $T_k = 4000 \text{ К}$; 3 – $T_k = 6500 \text{ К}$; 4 – зелена; 5 – червона; 6 – жовта; 7 – синя

Як видно з графіків рис. 3.4, величина пульсацій світлового потоку вздовж ЛЛ від центру ($l_{\text{тр}} = 283,5 \text{ мм}$) і до місць помітного впливу дії Фарадея темного простору залишається без змін. В навколо електродних областях вони зростають, що пояснюється періодичною зміною розмірів Фарадея темного простору протягом кожного півперіоду напруги живлення [171]. При цьому коефіцієнт пульсацій світлового потоку в області одного з електродів завжди більший, ніж в області іншого. Це пояснюється не ідентичністю конструктивних та емісійних властивостей електродних вузлів ЛЛ.

З ростом колірної температури ЛЛ (графіки 1, 2, 3 на рис. 3.4) коефіцієнт пульсацій світлового потоку дещо зменшується. У кольорових ЛЛ (рис. 3.4) коефіцієнт пульсацій зростає у напрямку зелений, червоний, жовтий і синій. Причому у червоних ЛЛ навколоелектродні пульсації практично відсутні. Найбільші пульсації світлового потоку притаманні синім ЛЛ. Вони майже у 3,78 рази більші, ніж у зелених. Точно такі ж результати ми отримали і при пропусканні випромінювання звичайної білої ЛЛ через кольорові (зелений, червоний, жовтий і синій) фільтри. Це вказує на те, що пульсації світлового потоку визначаються не тільки тривалістю післясвітіння люмінофору, а і кольором фільтра (довжиною хвилі електромагнітних випромінювань), через який проходить біле випромінювання від джерела світла. Це добре узгоджується із законом Ре-ля, згідно з яким інтенсивність розсіювання світла зворотно пропорційна четвертій степені довжини хвилі випромінювання ($1/\lambda^4$). Якщо це так, тоді пульсації світлового потоку синього випромінювання повинні бути, у порівнянні із червоним, більшими у середньому в $(655/470)^4 = 3,77$ рази; мінімум у $(610/485)^4 = 2,5$ рази і максимум у $(700/455)^4 = 5,6$ рази. Для досліджуваних нами ЛЛ це співвідношення склало $87\% / 29,8\% = 2,92$ рази, що добре вписується у загальну теорію.

Як видно з осцилограм рис. 3.5, зростання коефіцієнта пульсацій світлового потоку у кольорових ЛЛ у зазначеному вище напрямку обумовлено в основному зменшенням сталої складової (за рахунок зростання інтенсивнос-



Зелена ЛЛ
TLD 18W/17

$$U_{\max} = 237 \text{ мВ};$$

$$U_{\min} = 149 \text{ мВ};$$

$$237 / 149 = 1,59;$$

$$k_{\text{нF}} = 23 \text{ \%}.$$

1

Червона ЛЛ
TLD 18W/15

$$U_{\max} = 105 \text{ мВ};$$

$$U_{\min} = 48,6 \text{ мВ};$$

$$105 / 48,6 = 2,16;$$

$$k_{\text{нF}} = 29,8 \text{ \%}.$$

2

Жовта ЛЛ
TLD 18W/16

$$U_{\max} = 113 \text{ мВ};$$

$$U_{\min} = 44 \text{ мВ};$$

$$113 / 44 = 2,56;$$

$$k_{\text{нF}} = 33,8 \text{ \%}.$$

3

Біла ЛЛ
TLD 18W/827

$$U_{\max} = 409 \text{ мВ};$$

$$U_{\min} = 180 \text{ мВ};$$

$$409 / 180 = 2,27;$$

$$k_{\text{нF}} = 42,6 \text{ \%}.$$

4

Синя ЛЛ
TLD 18W/18

$$U_{\max} = 221 \text{ мВ};$$

$$U_{\min} = 12,5 \text{ мВ};$$

$$221 / 12,5 = 17,86;$$

$$k_{\text{нF}} = 87 \text{ \%}.$$

5

Рис. 3.5. Осцилограми пульсацій світлового потоку білої TLD 18 W/827 і кольорових люмінесцентних ламп фірми Philips у колі з індуктивним баластом

ті розсіювання) у випромінюванні та збільшенням власне глибини пульсацій. У білих ЛЛ – в основному зростанням глибини пульсацій на фоні досить значної сталої складової.

3.4. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку прямих люмінесцентних ламп в складі світильника з розщепленою фазою

Для визначення об'ємного (просторового) розподілу пульсацій світлового потоку в приміщенні від найбільш вживаних двохлампових світильників (ЛПО 2×36 з двома ЛЛ потужністю TLD 36 W/827, з рівномірною поперечною і косинусною повздовжньою кривими сили світла) в площинах на різних висотах від підлоги були проведені наступні дослідження. Спочатку були виміряні коефіцієнти пульсацій кожної з окремо взятих ЛЛ: а) ЛЛ ввімкнених в мережу через індуктивний баластний дросель ($k_{\text{нФ}} = 48 \%$); б) ЛЛ ввімкнених в мережу через індуктивно-ємнісний баласт ($k_{\text{нФ}} = 50 \%$). Потім ці ж ЛЛ в складі двох лампового світильника з розщепленою фазою (на рис. 3.6 виділений жирним) були розміщені по центру стелі безвіконного приміщення (розміри: ширина 4 м, довжина 5 м, висота 3 м) і проведені наступні вимірювання коефіцієнта пульсацій світлового потоку по вертикалі. Спочатку вимірювання проводилися по центру світильника на підлозі, а потім по вертикалі аж до висоти 275 см. Такі ж самі вимірювання проводилися і при зміщенні від центру світильника вліво і вправо на відстань 1 м і 1,9 м. За результатами вимірювань були побудовані графічні залежності, представлені на рис. 3.6, з якого випливає, що вертикальний коефіцієнт пульсації світлового потоку (КПСП) по центру світильника не залежить від відстані між світильником і датчиком вимірювального приладу і складає 24 % (в т. А прямої 1 на рис. 3.6), що вдвічі менше, ніж від окремо взятої ЛЛ, ввімкненої з баластним дроселем. При відхиленні від центру світильника на 1 м коефіцієнт пульсації спочатку зростає приблизно на 10 % (т. В на рис. 3.6), залишаючись незмінним до висоти 1,1 м. Надалі його величина поступово зростає, досягаючи в т. С рис. 3.6 29 % і максимуму на

висоті 275 см (криві 2, 3, 4, 5 на рис. 3.6), а саме : 33 % в т. D зі сторони ЛЛ, увімкненої з баластним дроселем, і 35 % в т. E зі сторони ЛЛ, увімкненої з індуктивно-ємнісним баластом.

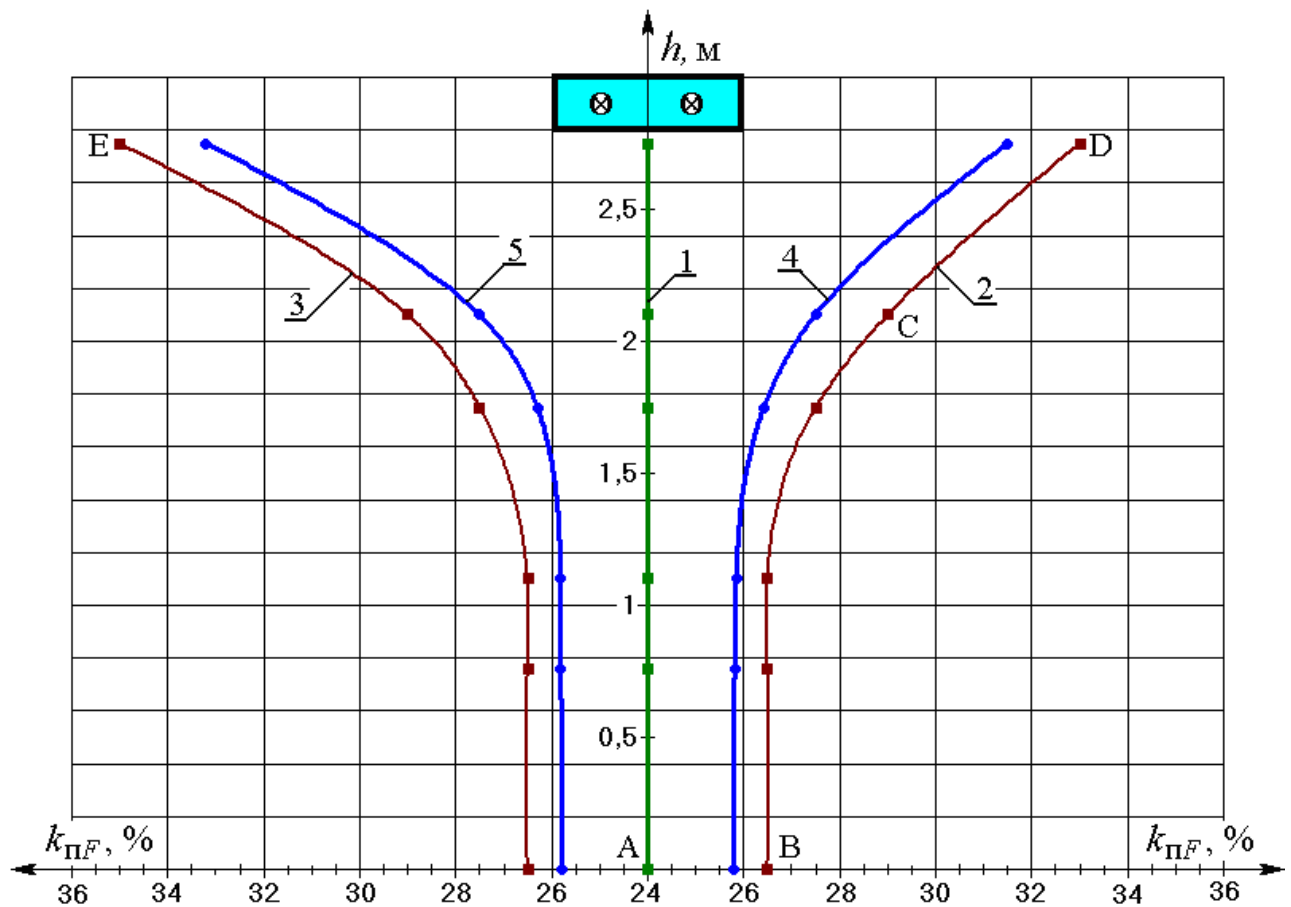
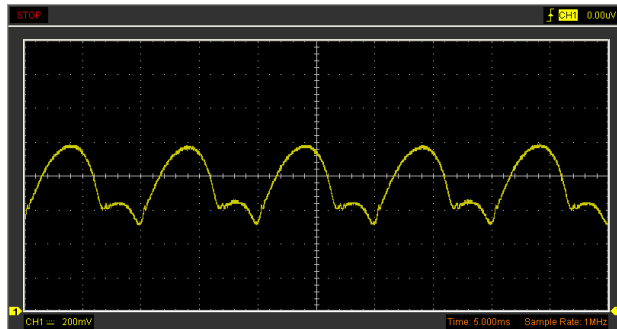


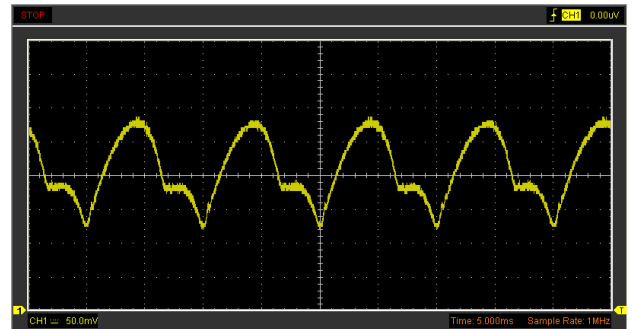
Рис. 3.6. Динаміка просторового розподілу коефіцієнта пульсацій світлового потоку в приміщенні від світильника з двома ЛЛ, з'єднаними за схемою з розщепленою фазою: 1 – по центру під світильником по вертикалі; 2 і 3 – на відстані 1-го м від центру світильника в обидві сторони по вертикалі; 4 і 5 – на відстані 1,9 м від центру світильника в обидві сторони по вертикалі. Зліва в світильнику ЛЛ ввімкнена послідовно з індуктивно-ємнісним баластом, а справа – з баластним дроселем

Динаміка осцилограм просторових пульсацій світлового потоку в зазначених точках наведена на рис. 3.7. З осцилограм випливає, що зростання пульсацій світлового потоку обумовлено зменшенням сталої складової в сумарному світловому потоці світильника за рахунок падіння частки світлового потоку від ЛЛ, ввімкненої через індуктивно-ємнісний баласт.

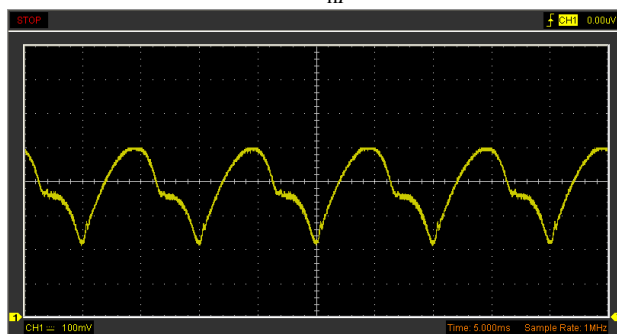
Таким чином пристельові просторові пульсації світлового потоку від дволампового світильника завжди більші, ніж на робочих поверхнях ($h = 76$ см). Це вказує на те, що відношення відстані L між світильниками (або рядами) до висоти встановлення над розрахунковою поверхнею h не повинно перевищувати $L/h \leq 0,4 - 0,6$. Це потрібно не тільки для забезпечення рівно-



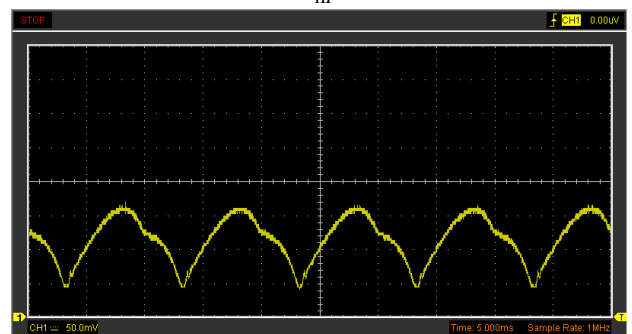
точка А, $k_{пF} = 24\%$



точка В, $k_{пF} = 26,5\%$



точка С, $k_{пF} = 29\%$



точка D, $k_{пF} = 33\%$

Рис. 3.7. Осцилограми пульсацій світлового потоку світильника з двома ЛЛ, ввімкненими за схемою з розщепленою фазою в точках, позначених на рис. 3.6

мірності освітлення робочих поверхонь, але й для отримання низьких значень просторових пульсацій в приміщенні. Крім того, світильники повинні бути розташовані таким чином, щоб ЛЛ, ввімкнені з баластним дроселем, обов'язково чергувалися з ЛЛ, ввімкненими з індуктивно-ємнісним баластом. Інакше ввімкнення ЛЛ у світильнику за схемою з розщепленою фазою не дасть належного позитивного ефекту не лише в просторі на висотах більше 2-х метрів, але й на робочих поверхнях. Очам прийдеться постійно переадаптовуватися не тільки до змін освітленості, але й до змін просторового коефіцієнта пульсації світлового потоку. Слід також зазначити, що при будь-якому розташуванні світильників, у яких ЛЛ ввімкнені за схемою з розщепленою фазою, позбавитися від

підвищених просторових пульсацій світлового потоку (в 1,4-1,5 раз) від крайніх рядів світильників, працюючих в мережі промислової частоти 50 Гц, не вдається.

3.5. Динаміка коефіцієнта пульсацій світлового потоку прямих і компактних люмінесцентних ламп при димеруванні

Дослідження впливу димерування на коефіцієнт пульсацій світлового потоку прямих і КЛЛ проводилося без додаткового підігрівання електродів за допомогою ЛАТРа і промислового симісторного регулятора «VIKO» 600 W/1000. Для досліджень були взяті не тільки лінійні (в колбі Т8) кольорові і білі стандартні, з найбільш розповсюдженими колірними температурами ($T_k=2700, 3000, 4000, 6500$ К) ЛЛ (рис. 3.8), але й КЛЛ. Стабілізація розряду в лінійних ЛЛ здійснювалася за допомогою індуктивного баласту, а в КЛЛ – електронного пускорегулювального апарату. За номінальну, для прямих ЛЛ, була прийнята напруга 230 В, а для КЛЛ – 220 В. В процесі досліджень порівнювалися КЛЛ різних виробників: а) PHILIPS – 18 W/2700 (криві 1, 2 на рис. 3.9) з номінальним коефіцієнтом пульсацій 5,2 % ; б) OSRAM – 18 W/2500 (криві 3, 4 на рис. 3.9) з номінальним коефіцієнтом пульсацій 5,5 % та в) MAXUS – 15 W/2700 (крива 5 на рис. 3.9) з номінальним коефіцієнтом пульсацій 7,2 %.

Аналіз вищенаведених графічних залежностей рис. 3.8 та рис. 3.9 показав, що будь-яке димерування (ЛАТРОм чи симісторним регулятором) незалежно від конфігурації (лінійні чи фігурні КЛЛ), колірної температури і кольору ЛЛ завжди призводить до зростання коефіцієнту пульсацій світлового потоку (КПСП) (криві 1, 2, 4, 5 на рис. 3.8). Виключенням є лише жовті ЛЛ, у яких КПСП в процесі димерування зменшується. Найбільший приріст (у 1,75 рази) КПСП в процесі димерування притаманний червоним ЛЛ, у яких одне з найменших номінальних значення $k_{н.пF} = 30$ % (крива 5 на рис. 3.4). Найменший приріст (у 1,35 рази) – притаманний синім ЛЛ, у яких найбільше

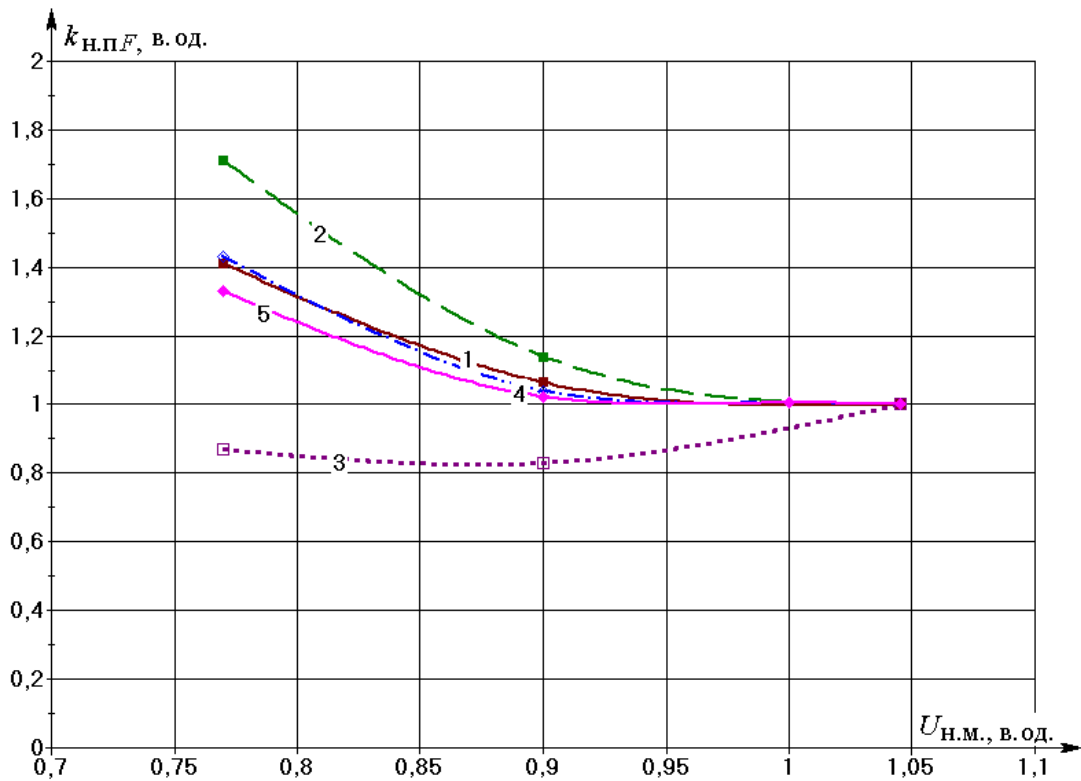


Рис. 3.8. Динаміка нормованого коефіцієнта пульсацій світлового потоку лінійних ЛЛ, ввімкнених з індуктивним баластом, при димеруванні за допомогою ЛАТРа до моменту погасання: 1 – для білих стандартних; 2 – для червоних; 3 – для жовтих; 4 – для зелених; 5 – для синіх люмінесцентних ламп

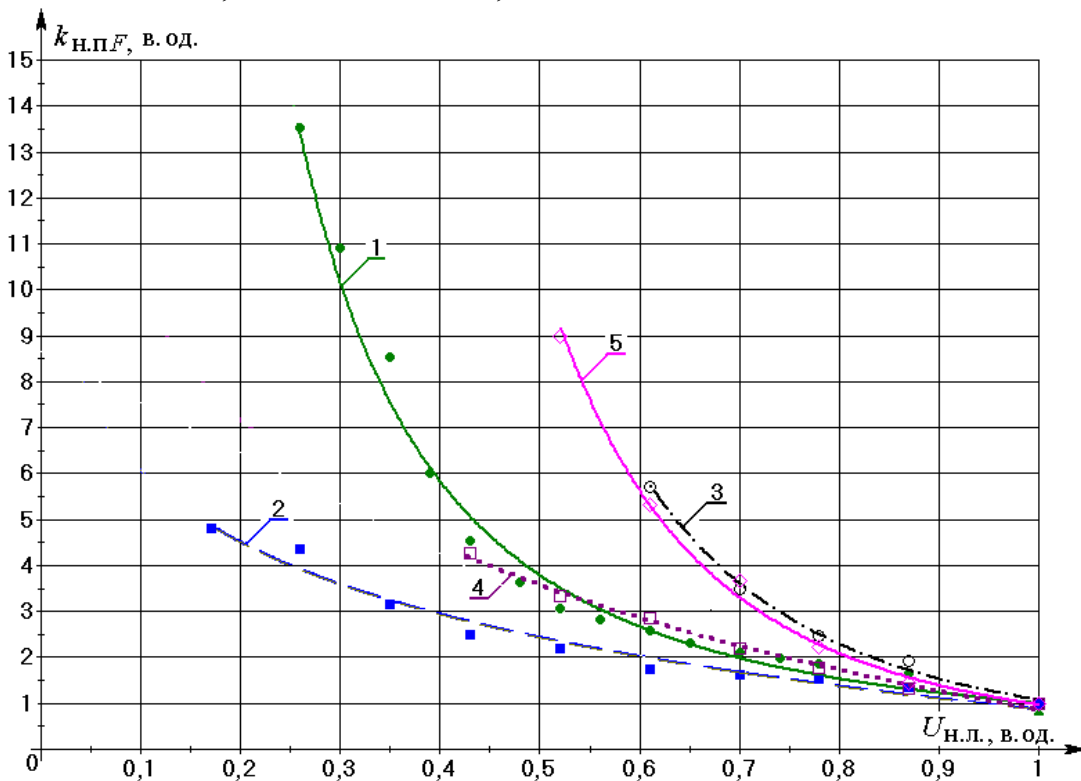


Рис. 3.9. Динаміка нормованого коефіцієнта пульсацій світлового потоку КЛЛ при димеруванні до моменту погасання за допомогою ЛАТРа (криві 1, 3, 5) та за допомогою симісторного регулятора «VIKO» 600 W/1000 (криві 2, 4)

номінальне значення $k_{н.пF} = 87 \%$ (крива 7 на рис. 3.4).

У КЛЛ процес димерування має більш широкі межі, ніж у лінійних ЛЛ, але в граничних точках, коли КЛЛ гасне, КПСП має неприпустимо великі значення. Так у КЛЛ виробництва PHILIPS при димеруванні за допомогою ЛАТРа він перевищує номінальний у 13,5 раз (крива 1 рис. 3.9), а регулятором «VICO» – у 4,8 рази (крива 2 рис. 3.9). КЛЛ фірми OSRAM (криві 3, 4 на рис. 3.9) виготовлені таким чином, що регулюванню практично не піддаються. При занижених до 0,6 від номінального значення напругах мережі ЕПРА, вмонтовані в них, сильно перегріваються. У КЛЛ фірми MAXUS вмонтований ЕПРА в процесі димерування швидко не перегрівається, але КПСП в кінцевій точці (крива 5 на рис. 3.9) зростає у 9 раз.

Таким чином, для димерування КЛЛ потрібні більш досконалі схеми ЕПРА, що однозначно призведе до подорожчання виробу.

3.6. Динаміка електричних і світлотехнічних параметрів розрядних ламп високого тиску при розгоранні та димеруванні

Дослідження електричних і світлотехнічних параметрів розрядних ламп високого тиску (РЛВТ) при розгоранні та димеруванні проводилося нами від стабілізованого джерела напруги на установці, принципова електрична схема якої зображена на рис. 3.10. Для плавної зміни напруги живлення використовувався ЛАТР-9М. Для забезпечення достатньої точності вимірювань були вибрані наступні вимірювальні прилади:

- вольтметр С 502 (клас точності 0,5; 45 Гц-1 МГц) для вимірювання напруги на лампі;
- ватметр Д 529 (клас точності 0,5; 45-65-1500 Гц) для вимірювання потужності, яка споживається лампою;
- універсальний прилад DIGITAL Power Meter PF9811 для вимірювання напруги мережі, струму лампи, коефіцієнта потужності схеми (в тому числі і за

рахунок виникнення вищих гармонік) і споживаної потужності баластним дроселем (D_p) і лампою.

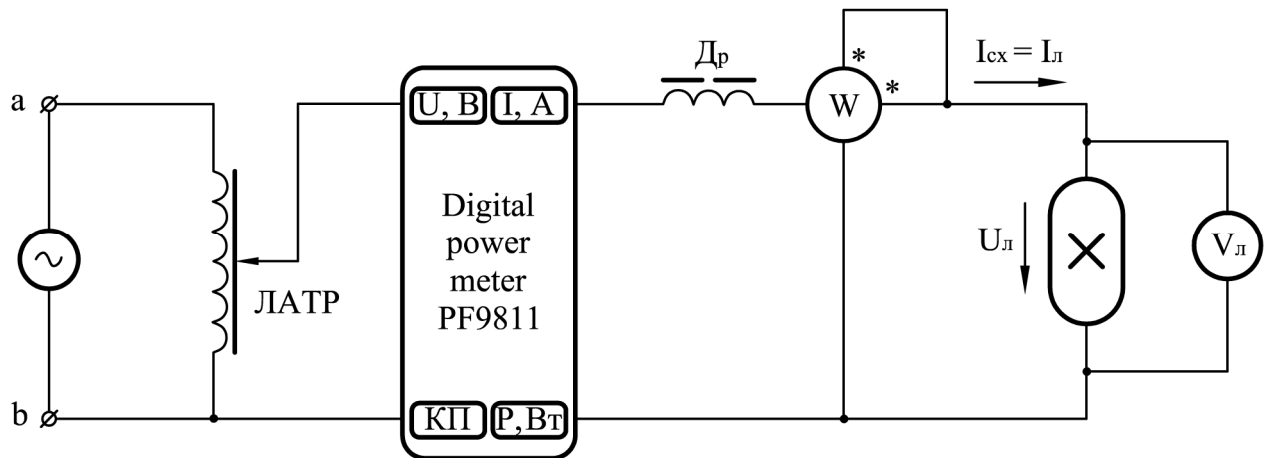
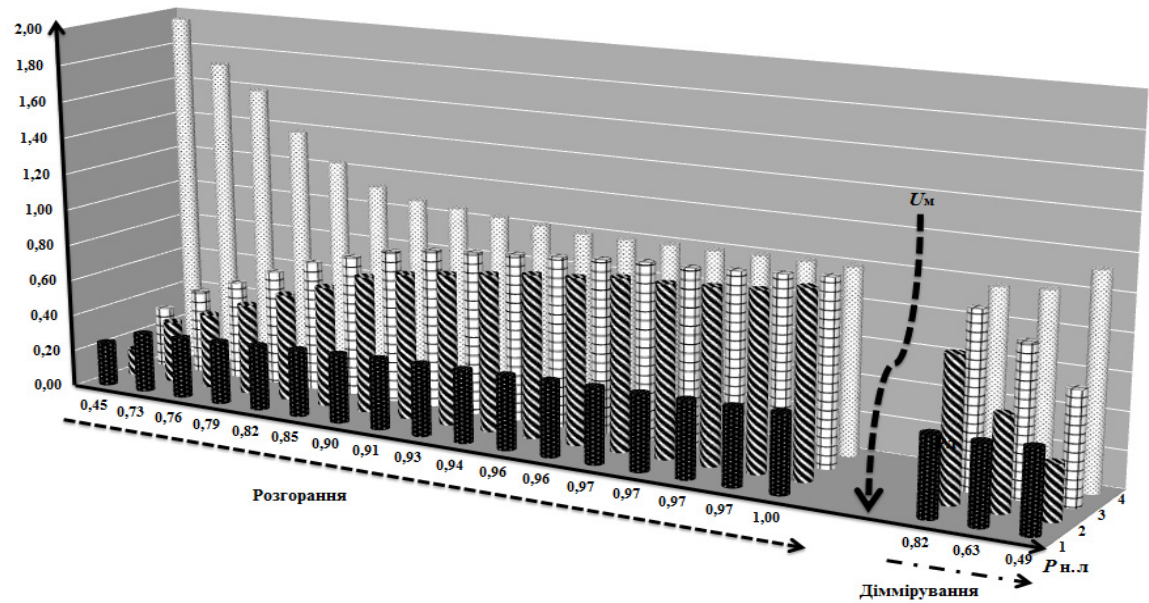


Рис. 3.10. Принципова електрична схема для вимірювання електричних параметрів розрядних ламп високого тиску

Вимірювання коефіцієнт пульсацій світлового потоку РЛВТ здійснювалося приладом комбінованим «ТКА-ПКМ» (08). Світловий потік вимірювався у фотометричній кулі «SPEKTRON Coating Integracion Sphere» ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА». Для забезпечення відтворюваності дослідів кількість РЛВТ, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною семи [162].

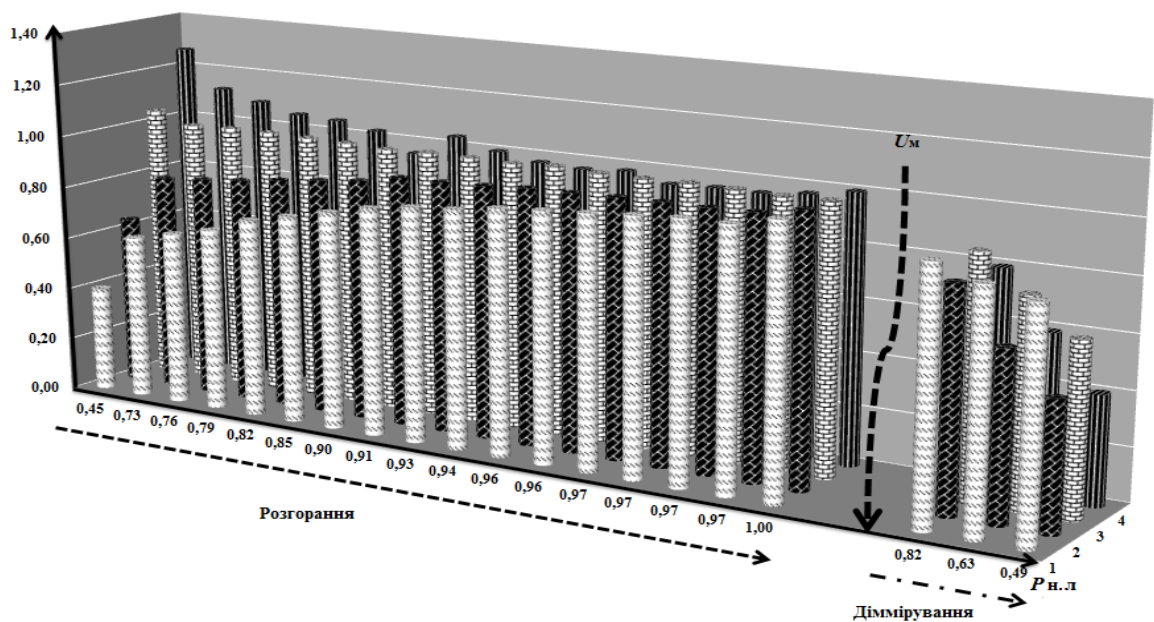
За результатами оброблених результатів були побудовані діаграми динаміки нормованих параметрів, представлені на рис. 3.11-3.17: коефіцієнта потужності схеми (КП), потужність, яку споживає дросель ($P_{др}$) і схема рис. 3.10 (P_{cx}), світлового потоку ($F_{н.л}$), напруги на лампі ($U_{н.л}$), світлової віддачі ($H_{н.л}$), струму лампи ($I_{н.л}$) та коефіцієнта пульсацій світлового потоку ($k_{н.лF}$) при розгоранні та димеруванні.

Аналіз отриманих результатів показав, що в момент виникнення розряду у всіх без виключення типів РЛВТ струм перевищує номінальне значення мінімум на 5 % (для ламп ДРІ 150) і максимум на 69 % (для ламп ДРЛ 400). Напруга навпаки, менша номінальної у 5-10 раз. Під час перехідного процесу розгорання струм зменшується, а напруга зростає до номінальних (усталених) значень. Тривалість перехідного процесу розгорання знаходиться в межах від 4 до 10 хв.



$P_{н.л}$	0,45	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,90	0,91	0,93	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	1,00			0,82	0,63	0,49
КП 1	0,24	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43			0,43	0,43	0,44
$F_{н.л}$ 2	0,15	0,34	0,41	0,50	0,59	0,66	0,75	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90	0,93	0,93	0,94	0,96	1,00			0,76	0,50	0,29
$H_{н.л}$ 3	0,33	0,46	0,54	0,63	0,72	0,78	0,84	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,95	0,97	0,99	1,00			0,93	0,80	0,60
$k_{н.пF}$ 4	1,96	1,72	1,60	1,38	1,23	1,12	1,07	1,06	1,04	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,99	1,00	1,13

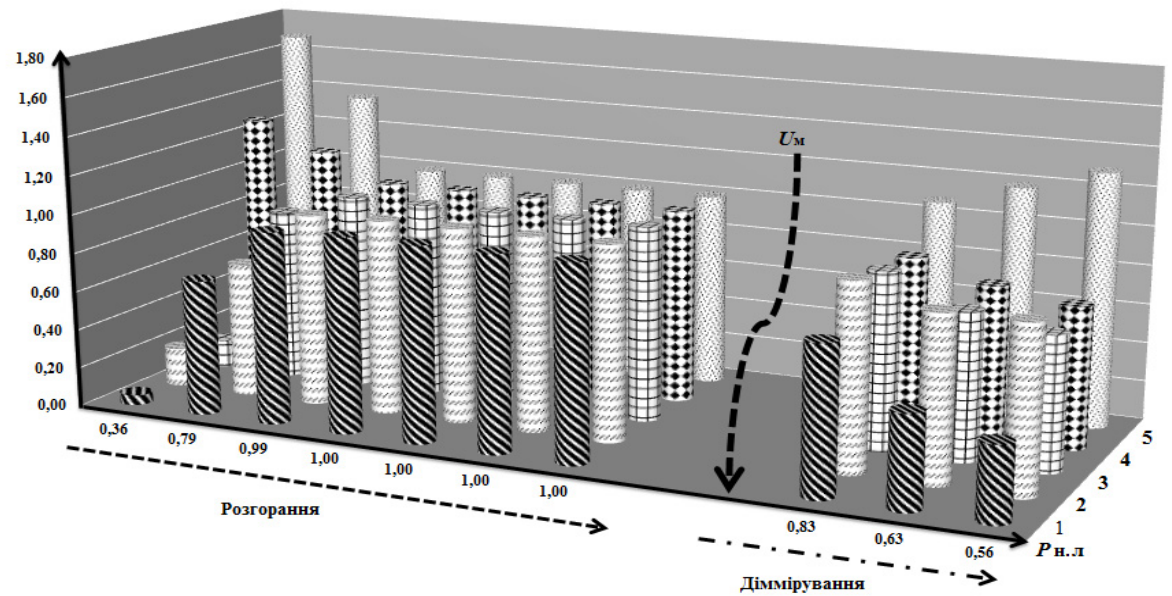
а)



$P_{н.л}$	0,45	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,90	0,91	0,93	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	1,00			0,82	0,63	0,49
$U_{н.л}$ 1	0,40	0,62	0,66	0,69	0,75	0,79	0,82	0,86	0,88	0,89	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	1,00			0,92	0,87	0,84
$P_{н.сх}$ 2	0,64	0,83	0,84	0,85	0,88	0,89	0,91	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	1,00			0,82	0,62	0,47
$I_{н.л}$ 3	1,049	1,008	1,014	1,013	1,009	1,007	1,001	1,006	1,006	1,003	1,010	1,003	1,003	1,006	1,002	0,997	1,000			0,89	0,76	0,63
$P_{н.др}$ 4	1,27	1,13	1,09	1,06	1,05	1,03	0,96	1,04	1,00	0,98	0,97	0,98	0,95	0,96	0,96	0,97	1,00			0,80	0,59	0,40

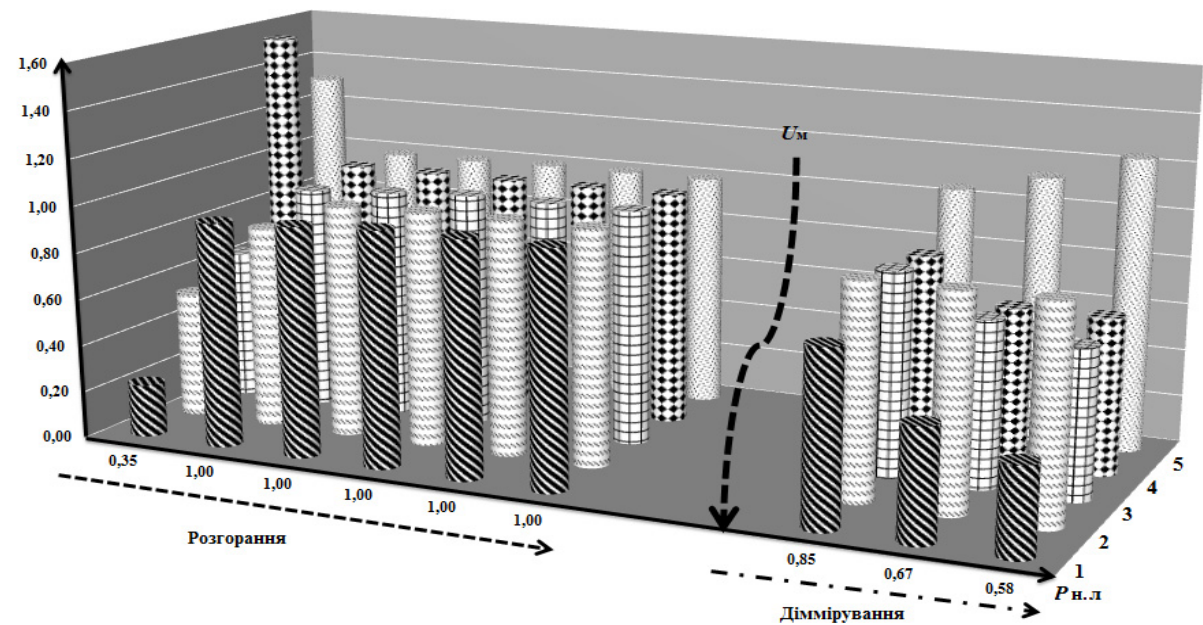
б)

Рис. 3.11. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу ДРІ 150 (матова) при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі (потужності лампи) до моменту погасання: а) 1 – КП; 2 – $F_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $k_{н.пF}$; б) 1 – $U_{н.л}$; 2 – $P_{н.сх}$; 3 – $I_{н.л}$; 4 – $P_{н.др}$



$P_{н.л}$	0,36	0,79	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00			0,83	0,63	0,56
$F_{н.л}$ 1	0,05	0,70	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00			0,75	0,47	0,38
$U_{н.л}$ 2	0,20	0,69	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00			0,95	0,84	0,84
$H_{н.л}$ 3	0,14	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,90	0,75	0,68
$I_{н.л}$ 4	1,28	1,14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,88	0,78	0,72
$k_{н.пF}$ 5	1,69	1,37	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			1,08	1,19	1,30

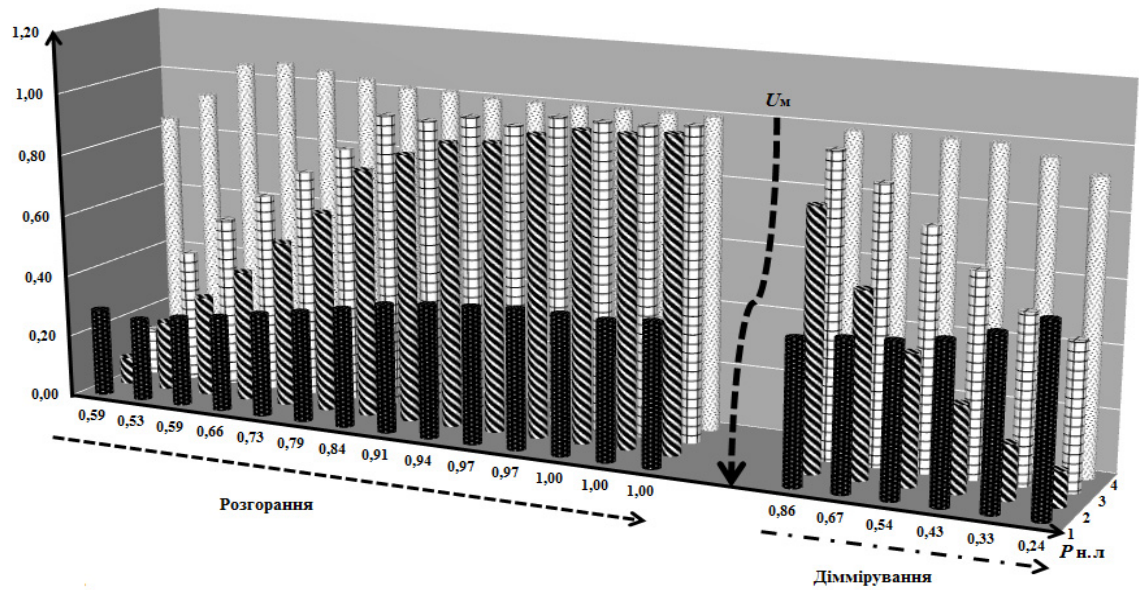
а)



$P_{н.л}$	0,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				0,85	0,67	0,58
$F_{н.л}$ 1	0,22	0,96	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00			0,73	0,47	0,37
$U_{н.л}$ 2	0,54	0,86	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00			0,9	0,9	0,9
$H_{н.л}$ 3	0,64	0,96	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00			0,86	0,7	0,63
$I_{н.л}$ 4	1,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,84	0,66	0,66
$k_{н.пF}$ 5	1,32	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00			1,05	1,13	1,24

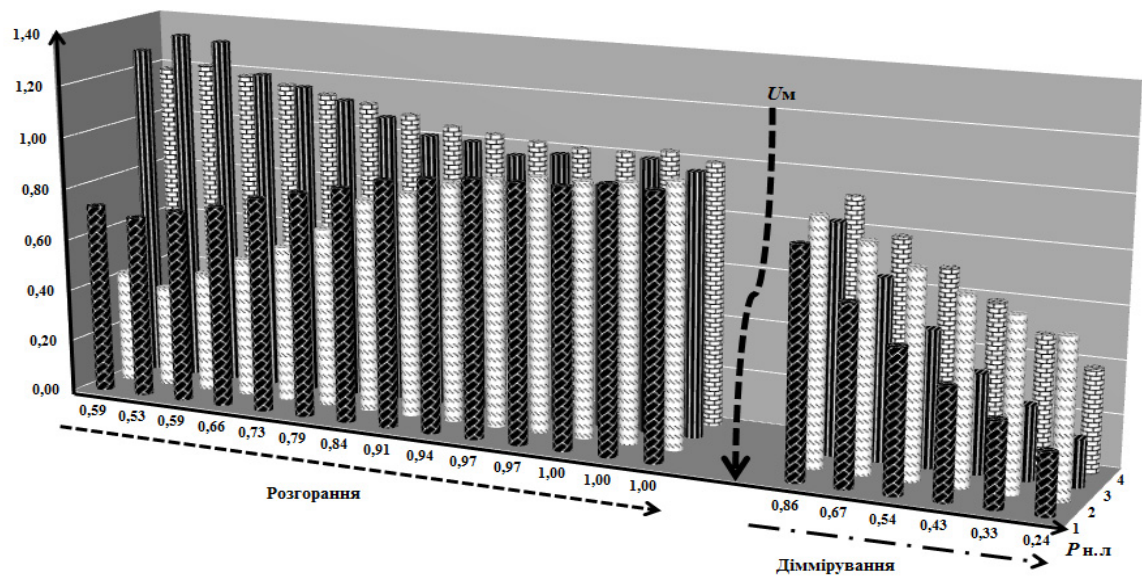
б)

Рис. 3.12. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу: а) ДРІ 250; б) ДРІ 400 при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі (потужності лампи) до моменту погасання: 1 – $F_{н.л}$; 2 – $U_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $I_{н.л}$; 5 – $k_{н.пF}$



$P_{н.л}$	0,59	0,53	0,59	0,66	0,73	0,79	0,84	0,91	0,94	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00			0,86	0,67	0,54	0,43	0,33	0,24
КП 1	0,29	0,27	0,29	0,31	0,34	0,36	0,39	0,42	0,43	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46			0,46	0,48	0,49	0,51	0,54	0,60
$F_{н.л}$ 2	0,09	0,23	0,33	0,43	0,54	0,65	0,80	0,86	0,91	0,93	0,96	0,99	0,99	1,00			0,83	0,59	0,41	0,28	0,18	0,11
$H_{н.л}$ 3	0,15	0,43	0,55	0,65	0,74	0,83	0,95	0,94	0,97	0,95	0,99	0,99	0,99	1,00			0,96	0,87	0,76	0,64	0,53	0,46
$k_{н.л}F$ 4	0,84	0,93	1,05	1,06	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,92

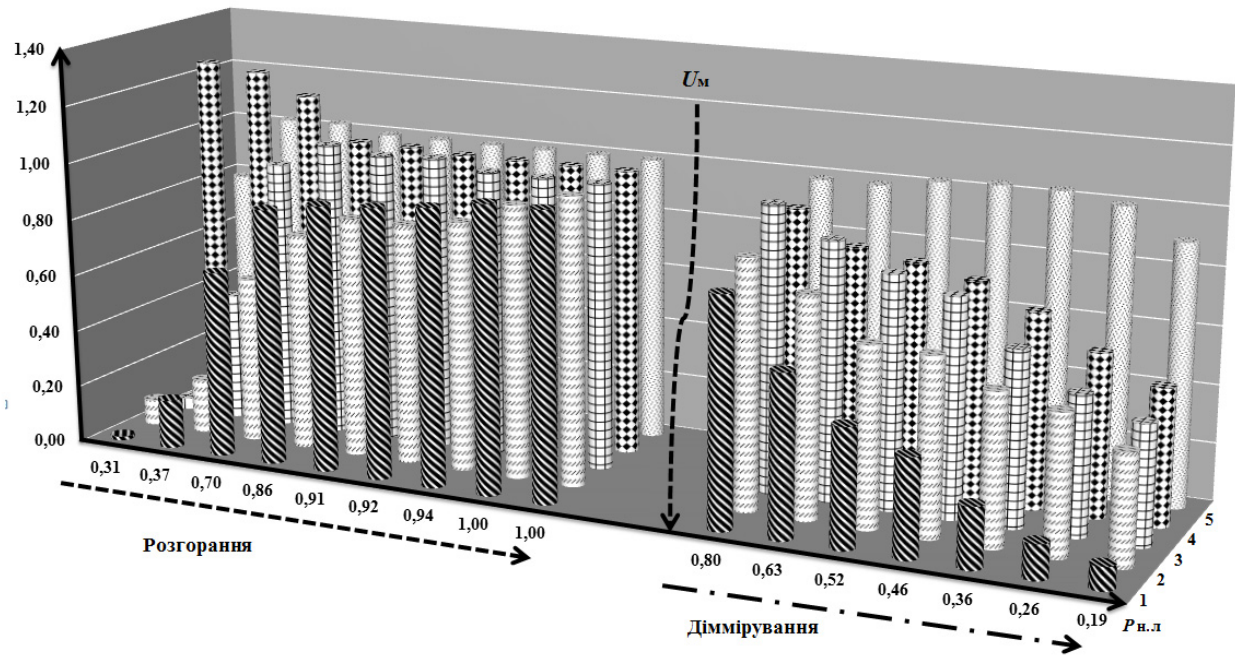
а)



$P_{н.л}$	0,59	0,53	0,59	0,66	0,73	0,79	0,84	0,91	0,94	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00			0,86	0,67	0,54	0,43	0,33	0,24
$P_{н.сх}$ 1	0,73	0,70	0,74	0,78	0,83	0,86	0,90	0,94	0,96	0,98	0,98	0,98	1,01	1,00			0,86	0,67	0,54	0,42	0,32	0,23
$U_{н.л}$ 2	0,43	0,39	0,46	0,54	0,60	0,69	0,82	0,86	0,91	0,95	0,97	0,97	0,98	1,00			0,92	0,85	0,77	0,70	0,65	0,59
$P_{н.др}$ 3	1,28	1,35	1,34	1,23	1,19	1,15	1,10	1,05	1,04	1,00	1,02	0,92	1,03	1,00			0,87	0,68	0,51	0,37	0,28	0,18
$I_{н.л}$ 4	1,19	1,21	1,18	1,16	1,13	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,01	1,01	1,03	1,00			0,92	0,79	0,69	0,59	0,49	0,39

б)

Рис. 3.13. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу ДНаТ 150 при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі до моменту погасання:
 а) 1 – КП; 2 – $F_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $k_{н.л}F$; б) 1 – $P_{н.сх}$; 2 – $U_{н.л}$; 3 – $P_{н.др}$; 4 – $I_{н.л}$

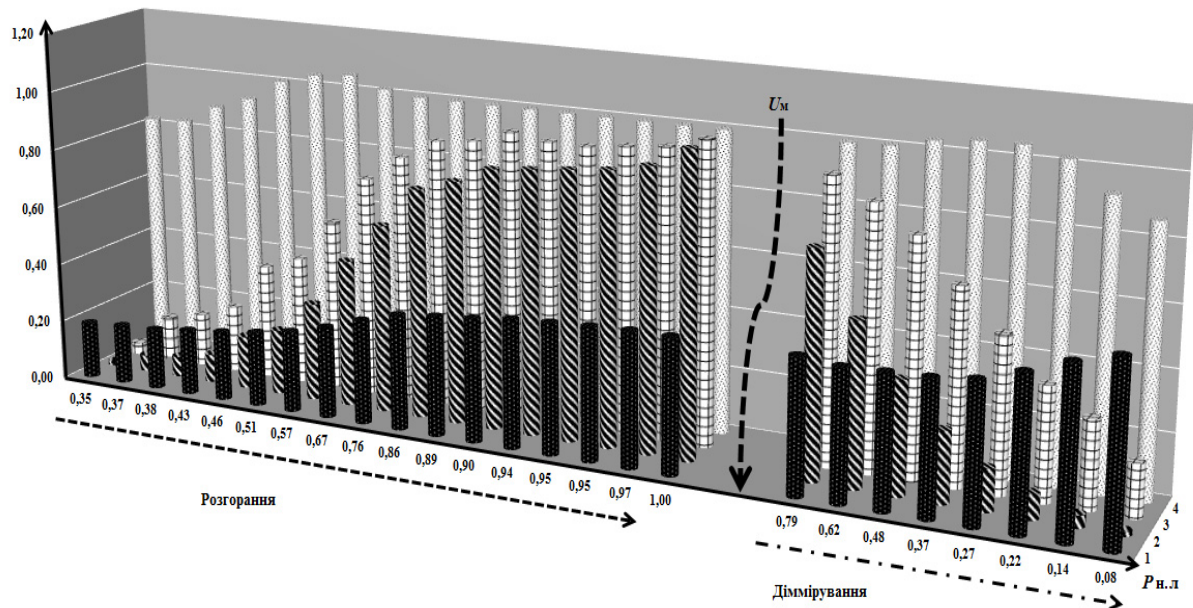


$P_{н.л}$	0,31	0,37	0,70	0,86	0,91	0,92	0,94	1,00	1,00			0,80	0,63	0,52	0,46	0,36	0,26	0,19
$F_{н.л}$ 1	0,01	0,17	0,66	0,90	0,93	0,95	0,97	1,00	1,00			0,79	0,56	0,41	0,34	0,21	0,12	0,08
$U_{н.л}$ 2	0,09	0,19	0,58	0,76	0,84	0,84	0,87	0,95	1,00			0,86	0,76	0,62	0,61	0,52	0,48	0,38
$H_{н.л}$ 3	0,04	0,45	0,95	1,04	1,02	1,03	1,00	1,00	1,00			0,99	0,89	0,80	0,75	0,60	0,48	0,41
$I_{н.л}$ 4	1,25	1,23	1,16	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00			0,93	0,82	0,79	0,75	0,67	0,56	0,47
$k_{н.л}F$ 5	0,79	1,02	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			0,99	0,99	1,02	1,03	1,03	1,00	0,90

Рис. 3.14. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу ДНаТ 250 при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі (потужності лампи) до моменту погасання: 1 – $F_{н.л}$, 2 – $U_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $I_{н.л}$; 5 – $k_{н.л}F$

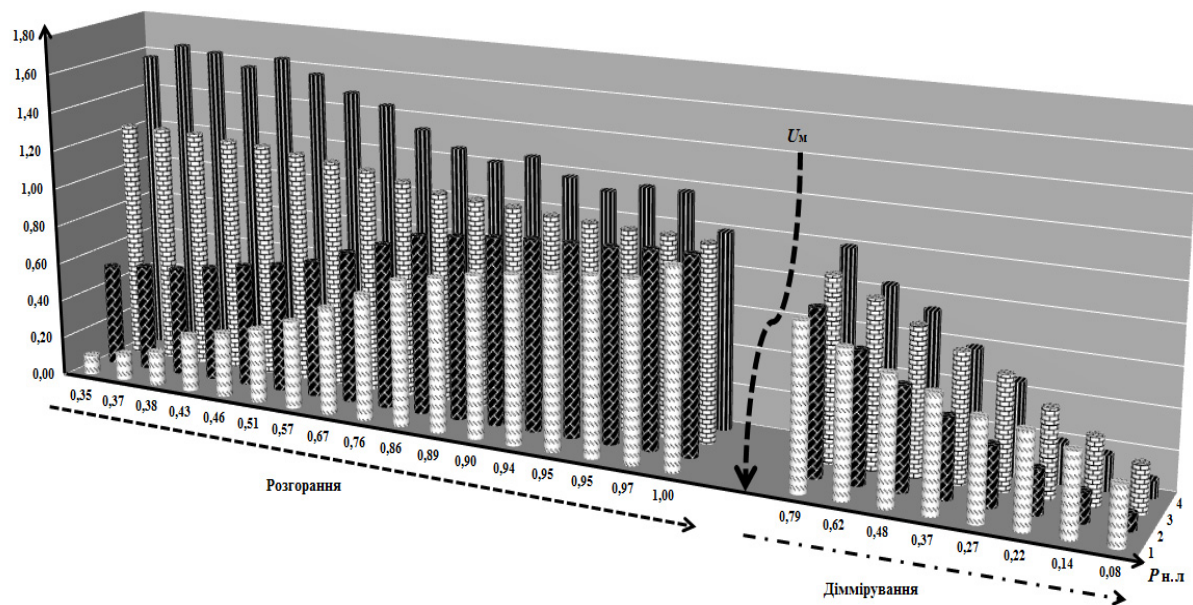
Коефіцієнт потужності схеми (РЛВТ+ЕмПРА) в момент виникнення розряду в РЛВТ менше від номінального в 2-3 рази (рис. 3.11,а; рис. 3.13,а; 3.15,а) і після закінчення перехідного процесу розгорання складає в середньому 0,5.

Динаміка нормованих значень КПСП при розгоранні у різних типів РЛВТ різна, а саме: а) у ламп типу ДРІ вона найбільша і зворотно пропорційна потужності лампи. У ДРІ 150 відношення початкового значення КПСП перехідного процесу розгорання до усталеного (номінального) становить 1,96 (рис. 3.11,а); у ДРІ 250 – 1,69 (рис. 3.12,а); у ДРІ 400 – 1,32 (рис. 3.12,б); б) у ламп типу ДРЛ 125 – 0,8 (рис. 3.16,а); у ДРЛ 250 – 0,87 (рис. 3.17,а); у ДРЛ 400 – 1,11 (рис. 3.17,б); в) у ламп типу ДНаТ коефіцієнт пульсацій світлового потоку не залежить від потужності лампи і має менші значення, ніж в усталеному режимі (рис. 3.13,а; рис. 3.14,а; рис. 3.15,а).



$P_{н.л}$		0,35	0,37	0,38	0,43	0,46	0,51	0,57	0,67	0,76	0,86	0,89	0,90	0,94	0,95	0,95	0,97	1,00			0,79	0,62	0,48	0,37	0,27	0,22	0,14	0,08	
КП	1	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,25	0,27	0,31	0,35	0,39	0,40	0,41	0,43	0,44	0,44	0,45	0,45			0,45	0,43	0,44	0,44	0,45	0,50	0,55	0,58	
	$F_{н.л}$	2	0,01	0,05	0,07	0,10	0,18	0,22	0,33	0,49	0,63	0,77	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,93	1,00			0,74	0,53	0,37	0,23	0,14	0,08	0,04	0,01
	$H_{н.л}$	3	0,04	0,15	0,18	0,22	0,39	0,43	0,58	0,74	0,83	0,89	0,91	0,95	0,94	0,93	0,95	0,96	1,00			0,93	0,86	0,78	0,64	0,51	0,37	0,29	0,17
	$k_{н.лF}$	4	0,82	0,83	0,89	0,93	1,01	1,04	1,05	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			1,00	1,01	1,03	1,05	1,05	1,02	0,93	0,87

а)

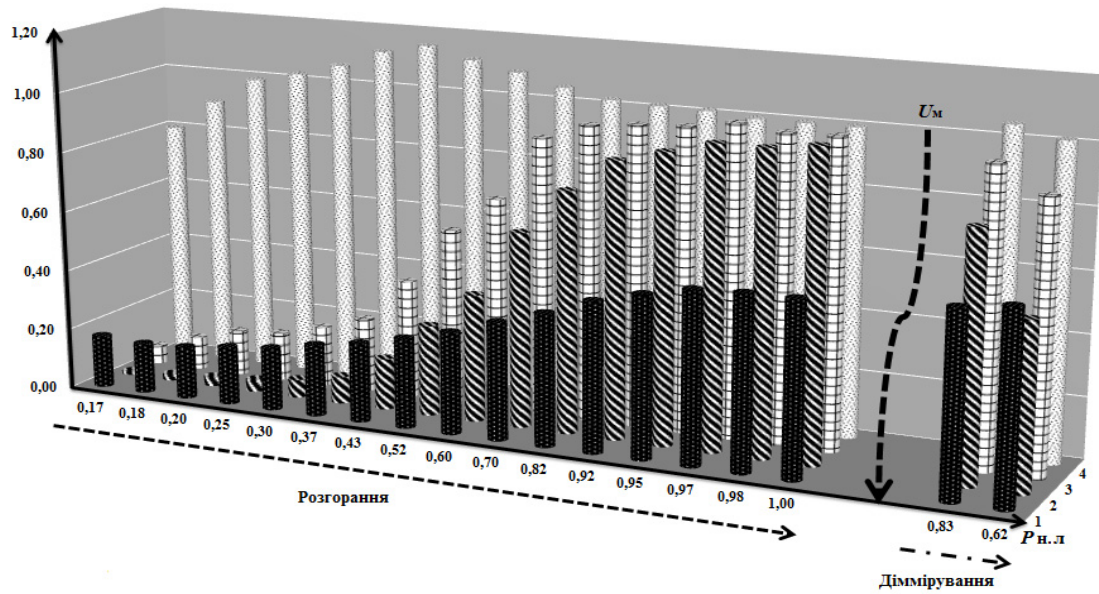


$P_{н.л}$		0,35	0,37	0,38	0,43	0,46	0,51	0,57	0,67	0,76	0,86	0,89	0,90	0,94	0,95	0,95	0,97	1,00				0,79	0,62	0,48	0,37	0,27	0,22	0,14	0,08
$U_{н.л}$	1	0,10	0,14	0,18	0,29	0,33	0,38	0,45	0,55	0,65	0,75	0,78	0,82	0,85	0,88	0,90	0,91	1,00				0,82	0,73	0,64	0,58	0,50	0,47	0,41	0,29
$P_{н.сх}$	2	0,53	0,55	0,56	0,59	0,63	0,66	0,70	0,78	0,85	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	1,00	1,00				0,82	0,65	0,52	0,40	0,30	0,22	0,15	0,08
$I_{н.л}$	3	1,24	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,15	1,12	1,08	1,07	1,06	1,04	1,03	1,02	1,02	1,00				0,92	0,84	0,74	0,64	0,56	0,44	0,33	0,24
$P_{н.др}$	4	1,58	1,65	1,63	1,57	1,64	1,57	1,49	1,45	1,34	1,26	1,22	1,26	1,18	1,13	1,18	1,18	1,00				1,00	0,84	0,75	0,59	0,46	0,20	0,17	0,09

б)

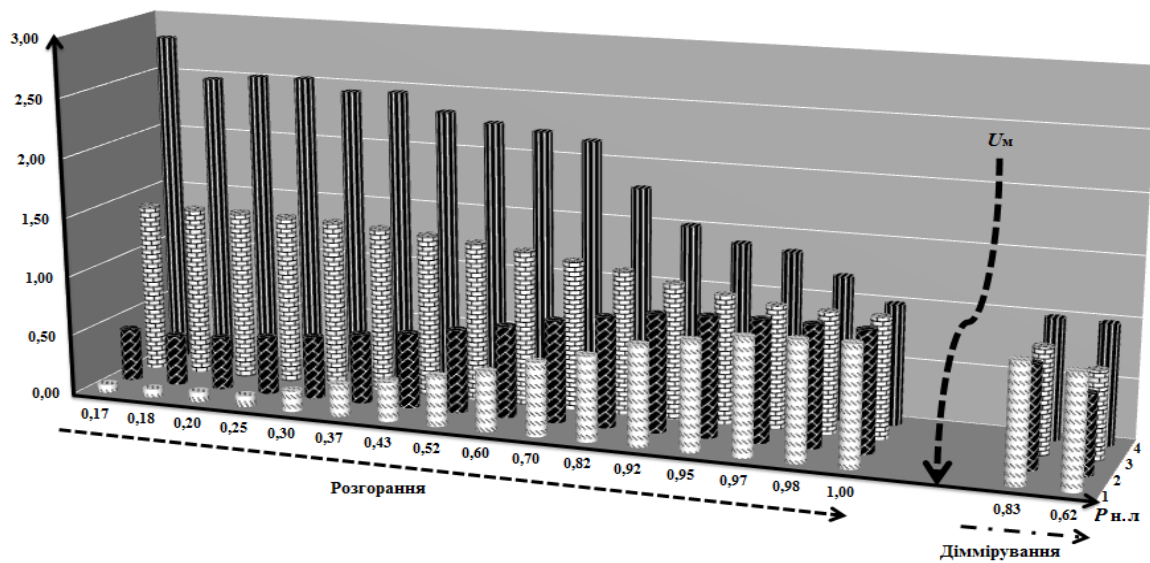
Рис. 3.15. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу ДНаТ 400 при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі до моменту погасання:

а) 1 – КП; 2 – $F_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $k_{н.лF}$; б) 1 – $U_{н.л}$; 2 – $P_{н.сх}$; 3 – $I_{н.л}$; 4 – $P_{н.др}$



$P_{н.л}$	0,17	0,18	0,20	0,25	0,30	0,37	0,43	0,52	0,60	0,70	0,82	0,92	0,95	0,97	0,98	1,00			0,83	0,62
КП 1	0,18	0,17	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,30	0,34	0,39	0,43	0,49	0,53	0,56	0,57	0,57			0,60	0,62
$F_{н.л}$ 2	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,17	0,30	0,42	0,64	0,79	0,90	0,94	0,98	0,98	1,00			0,80	0,54
$H_{н.л}$ 3	0,06	0,11	0,15	0,16	0,20	0,25	0,39	0,58	0,70	0,91	0,97	0,98	0,99	1,01	1,00	1,00			0,96	0,88
$k_{н.пF}$ 4	0,80	0,90	0,99	1,02	1,06	1,12	1,15	1,12	1,09	1,05	1,02	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00			1,05	1,01

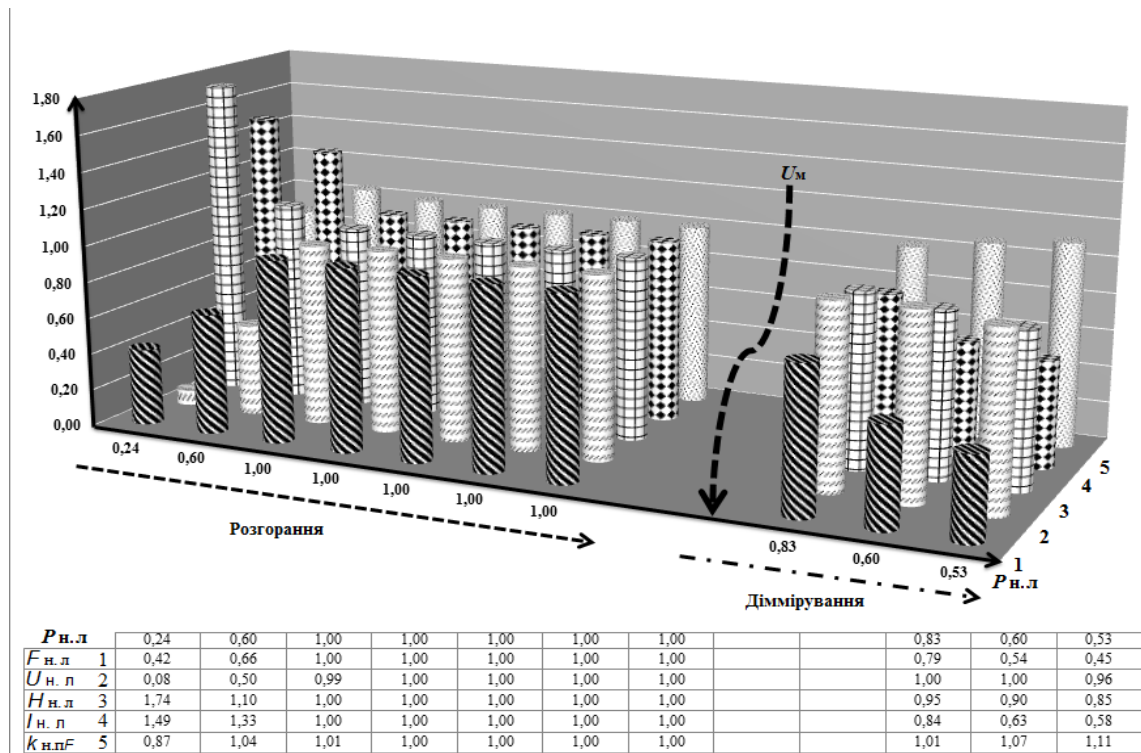
а)



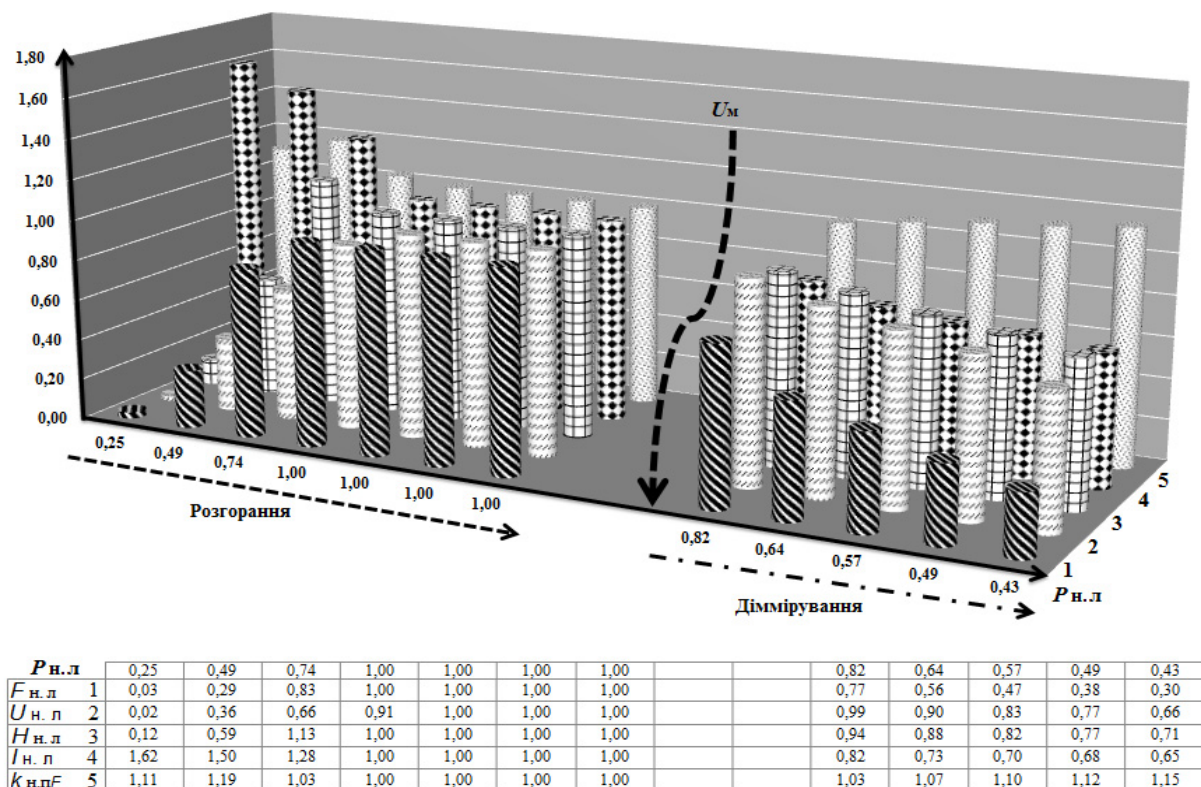
$P_{н.л}$	0,17	0,18	0,20	0,25	0,30	0,37	0,43	0,52	0,60	0,70	0,82	0,92	0,95	0,97	0,98	1,00			0,83	0,62
$U_{н.л}$ 1	0,07	0,07	0,08	0,09	0,17	0,27	0,33	0,42	0,50	0,61	0,70	0,84	0,91	0,98	0,99	1,00			0,98	0,93
$P_{н.сх}$ 2	0,44	0,42	0,44	0,48	0,52	0,58	0,63	0,70	0,77	0,85	0,92	0,98	1,00	1,01	1,01	1,00			0,85	0,66
$I_{н.л}$ 3	1,43	1,43	1,43	1,42	1,41	1,39	1,37	1,33	1,30	1,25	1,20	1,13	1,07	1,02	1,00	1,00			0,88	0,73
$P_{н.др}$ 4	2,81	2,47	2,52	2,53	2,44	2,46	2,32	2,25	2,21	2,16	1,80	1,51	1,40	1,36	1,20	1,00			1,00	0,99

б)

Рис. 3.16. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу ДРЛ 125 при розго-
ранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі (потужності ла-
мпи) до моменту погасання: а) 1 – КП; 2 – $F_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $k_{н.пF}$; б) 1 –
 $U_{н.л}$; 2 – $P_{н.сх}$; 3 – $I_{н.л}$; 4 – $P_{н.др}$



а)



б)

Рис. 3.17. Динаміка нормованих параметрів РЛВТ типу: а) ДРЛ 250; б) ДРЛ 400 при розгоранні та димеруванні за рахунок зменшення напруги мережі (потужності лампи) до моменту погасання: б) 1 – $F_{н.л}$; 2 – $U_{н.л}$; 3 – $H_{н.л}$; 4 – $I_{н.л}$; 5 – $k_{н.пF}$

Димерування РЛВТ розглянутих типів за допомогою ЛАТРа показало, що РЛВТ типу ДНаТ найкраще підходять для цього процесу. Це пояснюється тим, що у них: а) КПСП при димеруванні зменшується в середньому на 10 % (в той час як у ламп типу ДРІ зростає в середньому на 22 %, а у ламп ДРЛ – на 9 %); б) найбільша глибина димерування (в середньому десятикратна), в той час як у ДРІ – трьохкратна, а у ДРЛ – 2,5-кратна; в) найменша сумарна споживана потужність комплексу ДНаТ+ЕмПРА в режимі максимуму димерування; г) найбільша світлова віддача; д) найбільша середня тривалість світіння 28-32-48 тис. год. [172].

3.7. Особливості електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових джерел світла

Головною відмінністю напівпровідникових джерел світла (НДС) від традиційних є застосування абсолютно іншого принципу отримання світла (генерування квантів світлової енергії під час рекомбінації електронно-дірочних пар в *p-n* переході), при якому корпус, лінзи, радіатор і драйвер є невід’ємними їхніми складовими. При цьому для ефективного розсіювання кожного надлишкового вату тепла необхідно від 80 до 100 гр. ваги радіатора і низькі теплові опори в місцях контактів. Недотримання цих вимог призводить до надмірного зростання температури *p-n* переходу, від якої безпосередньо залежать такі складові параметри енергоефективності світлодіодних виробів як СТС, спад і стабільність світлового потоку при розгоранні та експлуатації, надійність та споживана потужність.

Аналіз останніх літературних джерел та публікацій [23, 143, 173] показав, що основною математичною моделлю напівпровідникових діодів є модель Еберса-Молла, яка дає можливість будувати їхні ампер-вольтні характеристики. Вольт-амперна характеристика НДС нелінійна. Діод починає проводити струм починаючи з деякої порогової напруги. Ця напруга дозволяє досить точ-

но визначити матеріал напівпровідника. У зв'язку з тим, що світловипромінюючі діоди, які відносяться до діодів з товстою базою (товщина бази в багато разів перевищує дифузійну довжину неосновних носіїв заряду), виготовляються на основі матеріалів з великою шириною забороненої зони, опір бази можна вважати таким, що не залежить від струму. Тоді при умові експоненціальної залежності граничної концентрації неосновних носіїв біля p - n переходу від напруги рівняння ампер-вольтних характеристик напівпровідникових діодів з товстою базою можуть бути представлені у вигляді

$$I = I_s \cdot \left[\exp \frac{e \cdot (U - I \cdot R_b)}{k_B \cdot T} \right], \quad (3.14)$$

де I – струм через діод, А;

I_s – струм насичення (або зворотній струм) діоду, А;

e – заряд електрону, $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл;

R_b – опір бази напівпровідникового діода, Ом;

k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,380662 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

T – температура p - n переходу, К.

Але у більшості випадків при напругах на p - n переході, близьких до значень контактної різниці потенціалів, опір бази при зміні струму не залишається незмінним, і тому хід ВАХ відхиляється від експоненціального, що ускладнює процес визначення реальної динаміки їхньої зміни. Це змушує дослідників звертатися до експериментальних методів визначення зазначених закономірностей для того, щоб встановити відмінності електричних і світлотехнічних характеристик НДС від подібних їм для традиційних джерел світла [174].

У більшості публікацій ампер-вольтні характеристики як звичайних напівпровідникових діодів, так і напівпровідникових ДС називають вольтамперними. З методологічної точки зору це не правильно. Враховуючи це ми будемо досліджувати саме ВАХ (рис. 3.18). Всі отримані нами залежності, наведені на рис. 3.19 – 3.22 є нормованими. Усі зразки досліджувалися за однако-

вою методикою. Дослідження проводилися при однакових умовах. Для забезпечення відтворюваності результатів експериментальних досліджень кількість ДС, згаданих в тексті кожної із згаданих груп, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною шести.

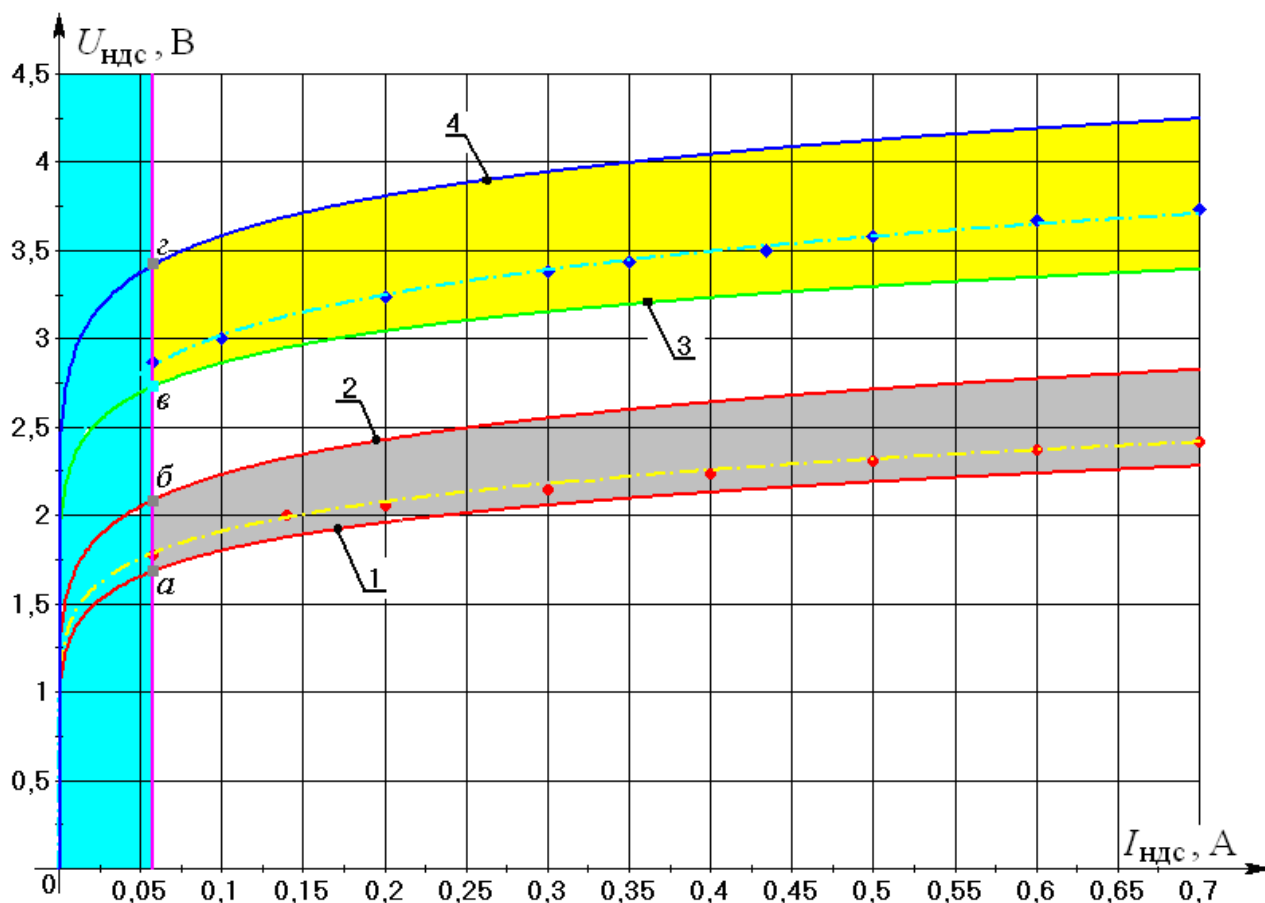


Рис. 3.18. Зони вольт-амперних характеристик для різнокольорових НДС серії С503: – між кривими 1-2 для червоних і жовтих; – між кривими 3-4 для зелених, голубих, синіх і білих

Аналіз як отриманих нами, так і опублікованих в різного роду виданнях даних щодо вигляду ВАХ білих і різнокольорових світлодіодів показав (рис. 3.18), що хід їхніх віток помітно відрізняються в залежності від кольору випромінювання [175]. Це пояснюється тим, що вони виготовляються на основі різних напівпровідникових матеріалів і саме тому мають різну ширину забороненої зони, а відповідно і різну висоту потенціального бар'єру на p - n переході.

Для того, щоб з'явився прямий струм необхідно зменшити висоту потенціального бар'єру, приклавши до p - n переходу пряму напругу близьку до кон-

тактої різниці потенціалів ϕ_k , яка визначає величину нечутливої зони і називається пороговою. З моменту досягнення порогової напруги струм починає стрімко збільшуватися. В $p-n$ переході на основі германія $\phi_k = (0,3-0,4)$ В, на основі кремнію $\phi_k = (0,6-0,8)$ В, а в напівпровідникових ДС ϕ_k залежить від кольору випромінювання (матеріалу напівпровідника) точки $a, б, в, г$ на рис. 3.18 та серії (див. табл. 3.1). Саме тому прямі вітки ВАХ згаданих діодів і світлодіодів зміщені вгору (рис. 3.18). ВАХ червоних і жовтих світлодіодів зосереджені в першій зоні, обмеженій кривими 1 і 2, а зелених, голубих, синіх і білих – в другій зоні, обмеженій кривими 3 і 4.

Таблиця 3.1

Параметри різнокольорових напівпровідникових джерел світла [175]

Колір	$\lambda, \text{нм}^*$	Пряме падіння напруги, В		Відхилення сили світла від типового значення для кутів випромінювання, %			
		Серія C503	Серія P42	15°	Типове значення	30°	Типове значення
червоний	624	2,1-2,6	2,5-3,0	-51 - +96	від 12000 кд	-47 - +135	від 5100 кд
жовтий	591	2,1-2,6	2,5-3,0	-55 - +81	від 13000 кд	-47 - +135	від 5100 кд
зелений	527	3,2-4,0	3,6-4,4	-51 - +90	від 34000 кд	-53 - +88	від 12500 кд
блакитний (синій)	470 (457)	3,2-4,0	3,6-4,4	-47 - +114	від 11000 кд	-48 - +100	від 4100 кд
білий	—	3,2-4,0	3,6-4,4	-30 - +37	вед 24000 КБ	-38 - +82	вед 9000 КБ

* Типове значення довжини хвилі випромінювання

З графіків рис. 3.19, побудованих нами на основі експериментальних даних, видно, що у теплових ДС зростаючою є не тільки ВАХ (крива 3), але й диференціальний (крива 6) та статичний (крива 9) опори. Це свідчить про те, що ці ДС можна вмикати в мережу без будь якої пускорегулювальної апаратури й просто здійснювати регулювання світлового потоку від максимально можливого значення до нуля. При цьому максимально можливе значення не може перевищувати номінальне більше, ніж вдвічі, у зв'язку з нищівним впливом

перенавантажень на СТС. Так, при живленні ТДС напругою, яка на 20 % перевищує її номінальне значення, СТС зменшується більше ніж у 10 раз [130].

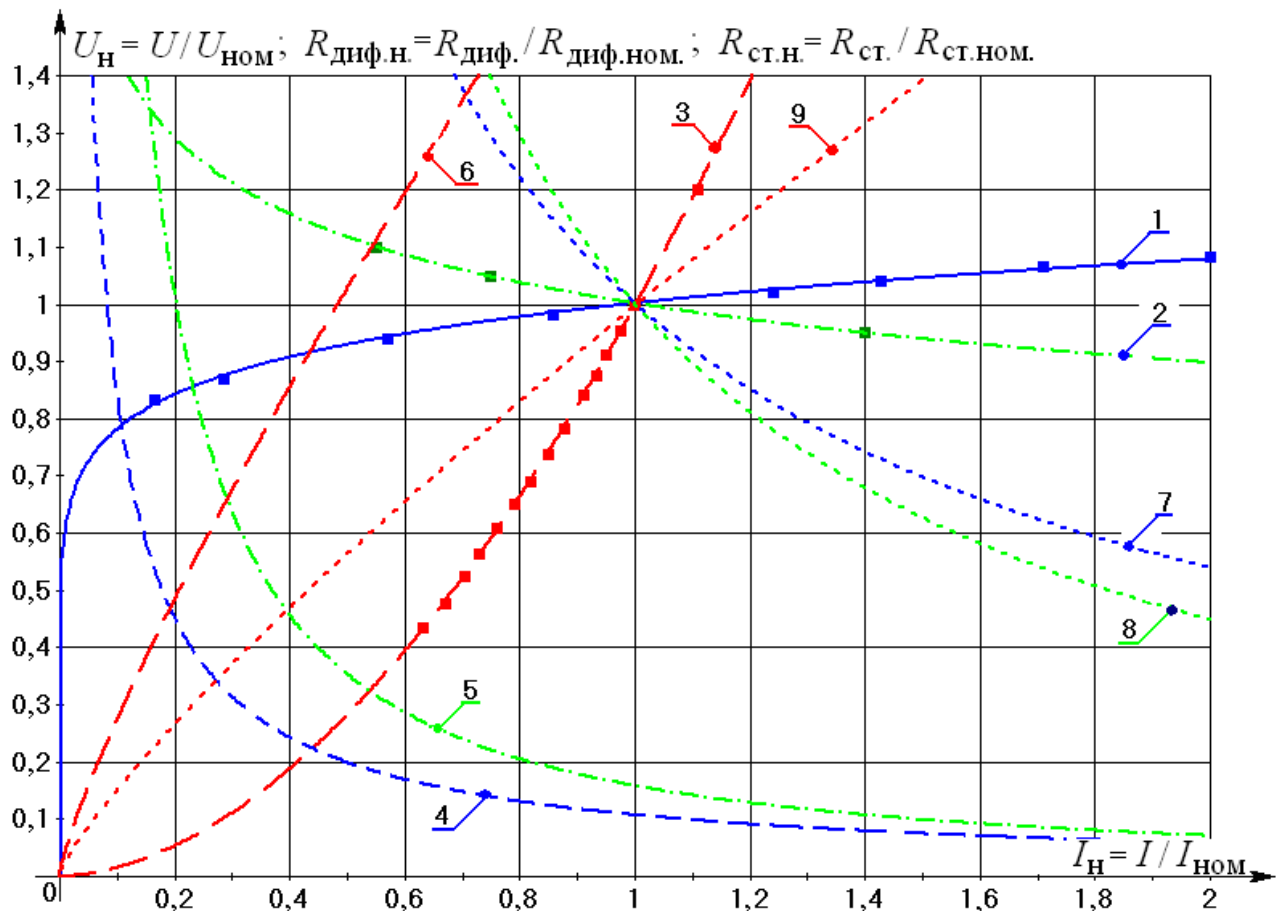


Рис. 3.19. Нормовані вольт-амперні характеристики ($U_n = f(I_n)$): 1 – напівпровідникових; 2 – розрядних; 3 – теплових джерел світла, а також їхні диференціальні ($R_{\text{диф.н}} = f(I_n)$) 4, 5, 6 та статичні ($R_{\text{ст.н}} = f(I_n)$) 7, 8, 9 опори відповідно

У розрядних ламп низького (люмінесцентних) і високого (типу ДРЛ, ДНаТ і ДРІ) тиску ВАХ падаючі (крива 2 на рис. 3.19). Падаючими є й їхні статичний (крива 8) та від’ємний диференціальний (крива 5, яка наведена на рис. 3.19 по модулю, як дзеркальне відображення реальної залежності відносно осі абсцис) опори. Це вказує на те, що для роботи таких ДС обов’язково потрібна пускорегулювальна апаратура (струмообмежувальний баласт і запалювальний пристрій).

Регулювання світлового потоку в широких межах (від максимального значення, яке не може перевищувати номінальне більше ніж на 20 %, у зв’язку з відчутним падінням СТС (приблизно на 30 %) і до значень, притаманних

струмам, у п'ять разів менших від номінальних, при яких виникають страти [176]), можливе лише для розрядних ламп низького тиску, при умові застосування спеціальних схем, які б забезпечували підтримання напруги на номінальному рівні й постійне підігрівання катодів люмінесцентних ламп для забезпечення високої термоелектронної емісії з них при зменшенні розрядного струму.

Регулювати світловий потік РЛВТ набагато складніше. Це обумовлено суттєвою відмінністю конструкції електродів для розрядних ламп високого тиску від конструкції електродів для люмінесцентних ламп. Якщо у люмінесцентних ламп електроди двохштиркові, то у розрядних ламп одноштиркові. Це виключає можливість забезпечення високої термоелектронної емісії з катодів шляхом їх підігрівання від стороннього джерела енергії під час регулювання світлового потоку. Тому глибина регулювання світлового потоку у РЛВТ типу ДРІ і ДРЛ навіть на високих частотах не перевищує 30 % і часто супроводжується акустичним резонансом [177]. Виключенням є лише лампи типу ДНаТ, які легко запалюються і стабільно працюють при димеруванні до 50-60 % включно.

У НДС ВАХ (крива 1 на рис. 3.19 та всі залежності на рис. 3.18) зростаюча, але має нечутливу зону від 0,0 до 0,6 на осі ординат (напруг). Диференціальний (крива 4) та статичний (крива 7) опори додатні і з ростом струму зменшуються за гіперболічним законом. Тому для них потрібні високостабільні джерела живлення (драйвери). В зв'язку з тим, що в околі номінальних значень електричних параметрів НДС однопроцентна зміна напруги живлення призводить до десятипроцентної зміни струму, драйвери повинні бути стабілізаторами струму, а не напруги.

Аналіз отриманих нами експериментальних даних також показав, що прямі вольт-амперні (залежності 1 – 4 на рис. 3.18), а значить і ампер-вольтні характеристики всіх без виключення НДС відрізняються від відповідних характеристик звичайних напівпровідникових діодів і добре описуються наступними степеневими функціями

$$U = R_{\text{ном}} \cdot I^{\beta}, \quad (3.15)$$

$$I = G_{\text{ном}} \cdot U^{\alpha}, \quad (3.16)$$

де U, I – напруга і струм НДС відповідно, В, А;

$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}^{\beta}$ – номінальний опір НДС;

$G_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}^{\alpha}$ – номінальна провідність НДС;

$U_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}$ – номінальні напруга і струм НДС, зазначені в нормативно технічній документації відповідно В, А;

β, α – значення показників степені для струму у виразі (3.15) і напруги у виразі (3.16) відповідно, які визначають крутизну ВАХ і АВХ в залежності від максимуму довжини хвилі випромінювання λ_m НДС. Їх значення, отримані нами в результаті апроксимації експериментальних даних, наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Дані, необхідні для побудови вольт-амперних та ампер-вольтних характеристик за математичними моделями (3.15) та (3.16) для кольорових і білих НДС

Колір НДС	Довжина хвилі λ , нм [177]	Коефіцієнт α^*	Коефіцієнт β^*	Напруга на НДС, В	Струм НДС, А	$G_{\text{ном}} = \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}^{\alpha}}$	$R_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}^{\beta}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
червоний	610- 655 -700	8,2470	0,121	2,1-2,6 (2,22)	0,35	$(4,872 \cdot 10^{-4})$	2,520
оранжевий	587- 598 -610	8,9470	0,112	2,1-2,6 (2,28)	0,35	$(2,196 \cdot 10^{-4})$	2,564
жовтий	550- 568 -587	9,1620	0,109	2,1-2,6 (2,36)	0,35	$(1,341 \cdot 10^{-4})$	2,646
Зелений	505- 527 -550	11,414	0,087	3,2-4,0 (3,25)	0,35	$(5,028 \cdot 10^{-7})$	3,563
Блакитний	485- 495 -505	10,843	0,092	3,2-4,0 (3,45)	0,35	$(5,158 \cdot 10^{-7})$	3,800
Синій	455- 480 -485	10,774	0,093	3,2-4,0 (3,50)	0,35	$(4,811 \cdot 10^{-7})$	3,858
Фіолетовий	400- 427 -455	10,572	0,095	3,2-4,0 (3,60)	0,35	$(4,600 \cdot 10^{-7})$	3,976

* Значення коефіцієнтів α та β для відповідних діапазонів кольорів (стовпчик 2). Значення $G_{\text{ном}}$ (стовпчик 7) та $R_{\text{ном}}$ (стовпчик 8) розраховані для напруг, зазначених в стовпчику 5 в дужках.

У зворотному напрямку світлодіоди не вмикають, тому зворотні вітки ВАХ напівпровідникових ДС при проектування драйверів до уваги не приймають, хоча і мають на увазі, що пробивні зворотні напруги досить малі і не перевищують 5 В.

Наявність аналітичних виразів (3.15) і (3.16) дає можливість отримати вирази для визначення всіх електричних характеристик НДС для будь-яких наперед заданих значень напруг і струмів, а саме:

– потужності, як добуток виразу (3.15) на струм $P = U \cdot I = (R_{\text{ном}} \cdot I^{\beta}) \times I = R_{\text{ном}} \cdot I^{(\beta+1)}$ або як добуток виразу (3.16) на напругу $P = G_{\text{ном}} \cdot U^{\alpha} \cdot U = G_{\text{ном}} \cdot U^{(\alpha+1)}$;

– статичного опору, як частку від ділення виразу (3.15) на струм $R_{\text{ст}} = R_{\text{ном}} \times I^{\beta} / I = R_{\text{ном}} \cdot I^{(\beta-1)}$;

– диференціального опору, як похідну від виразу (2) $R_{\text{диф.}} = (R_{\text{ном}} \cdot I^{\beta})' = R_{\text{ном}} \cdot \beta \cdot I^{(\beta-1)}$;

– статичної провідності, як частку від ділення виразу (3.16) на напругу $G_{\text{ст}} = G_{\text{ном}} \cdot U^{\alpha} / U = G_{\text{ном}} \cdot U^{(\alpha-1)}$;

– диференціальної провідності, як похідну від виразу (3.16) $G_{\text{диф.}} = (G_{\text{ном}} \cdot U^{\alpha})' = G_{\text{ном}} \cdot \alpha \cdot U^{(\alpha-1)}$.

Регулювати світловий потік НДС так само просто, як і теплових ДС. Межі регулювання, у порівнянні з іншими відомими ДС, у НДС найбільш широкі й знаходяться в діапазоні від 1,6 від номінального значення, при подвійному номінальному струмі, і до нуля (крива 2 на рис. 3.20).

Найбільші світлові віддачі у НДС (крива 6 на рис. 3.20) спостерігаються при малих струмах. Поступове збільшення струму призводить до її падіння за законом, близьким до лінійного. В той час, як у теплових ДС як світлова віддача, так і світловий потік з ростом струму постійно нелінійно зростають. А у люмінесцентних ламп максимальні світлові віддачі спостерігаються при номі-

нальних значеннях струму. При перевищенні номінального струму відбувається падіння світлової віддачі.

Вище згадані нормовані залежності електричних і світлотехнічних параметрів НДС та ТДС від нормованих значень струму (рис. 3.20) добре апрокси-

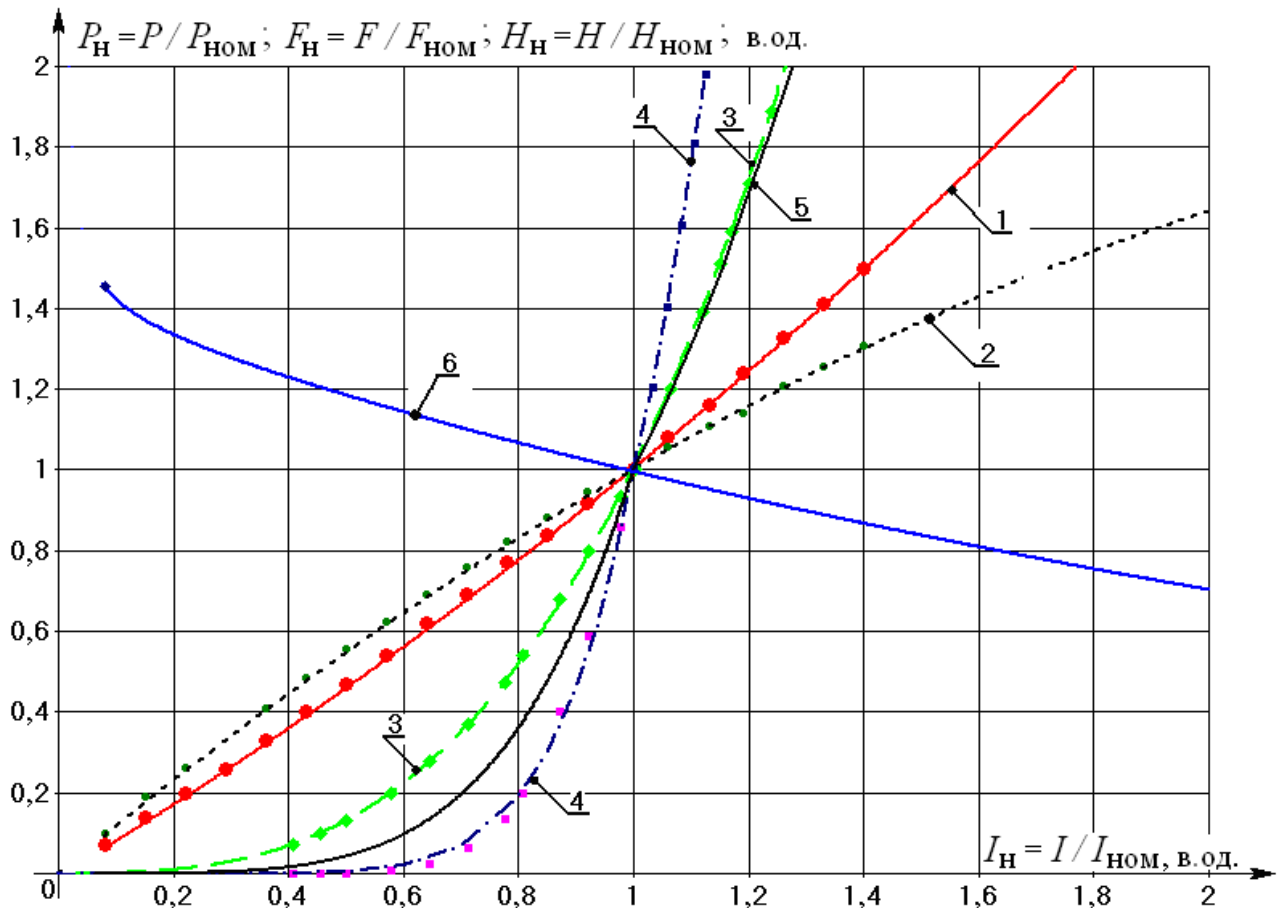


Рис. 3.20. Залежності нормованих значень потужності (1,3), світлового потоку (2,4) та світлової віддачі (5,6) теплових та напівпровідникових ДС від нормованих значень напруги, струму через них відповідно

муються наступними математичними залежностями (при стандартному відхиленні 0,005 і коефіцієнті кореляції $R^2 = 0,99$)

$$P_H = 0,16 \cdot I_H^2 + 0,85 \cdot I_H + 0,05 \text{ — для НДС}; \quad (3.17)$$

$$F_H = -0,18 \cdot I_H^2 + 1,18 \cdot I_H \text{ — для НДС}; \quad (3.18)$$

$$H_H = \frac{F_H}{P_H} =, \text{ для } 0,08 \leq I_H \leq 2,0, \text{ — для НДС}; \quad (3.19)$$

$$P_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{2,95}, \text{ для } 0 \leq I_{\text{н}} \leq 1,2 - \text{ для ТДС}; \quad (3.20)$$

$$F_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{7,5} \text{ для } 0 \leq I_{\text{н}} \leq 1; \quad F_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{5,8} \text{ для } 1 \leq I_{\text{н}} \leq 1,2 - \text{ для ТДС}; \quad (3.21)$$

$$H_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{4,55} \text{ для } 0 \leq I_{\text{н}} \leq 1; \quad H_{\text{н}} = I_{\text{н}}^{2,85} \text{ для } 1 \leq I_{\text{н}} \leq 1,2 - \text{ для ТДС}. \quad (3.22)$$

Як видно з виразів (3.17-3.22), у кожен з них входить нормоване значення номінального струму, що надає їм універсальності з точки зору їх застосування для визначення необхідних характеристик драйверів і розрахунку режимів кінцевих пристроїв комутації, навантажених світловипромінюючими діодами. При цьому значення номінального струму є визначальним. Тому для визначення оптимального значення номінального струму, розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів (ретрофітних ламп, світильників різного роду тощо), з точки зору забезпечення необхідної величини СТС, нами були проведені дослідження динаміки перехідних процесів зростання температури на кристалах світлодіодів і спаду світлового потоку виробу від моменту вмикання до переходу в усталений режим. Для досліджень були відібрані НДС шести різних виробників різної потужності, а саме: НДС 1 – PHILIPS Master LED Bulb MV 8 W; НДС 2 – SW-101-7 W 190-240 V 7 W; НДС 3 – TLF BL 133 10 W (Telefunken); НДС 4 – Verbatium model # 52019 9 W; НДС 5 – ТЛЦ 03-01-10-003 УХЛ 4 10 Вт; НДС 6 – МЕЙ-Е27-10 Вт.

Для забезпечення відтворюваності результатів дослідів кількість НДС кожного типу, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною шести [162]. Дослідження проводилися у фотометричній кулі «SPEKTRON Coating Integracion Sphere». Температура на кристалі вимірювалася за допомогою термопар. Результати вимірювань по кожному із НДС усереднювалися. Отримані дані були згруповані у дві групи по 3 НДС в кожній (табл. 3.3 та 3.4) з близькими за значенням температурами перегрівання корпусу і початковими нормованими світловими потоками. Дані по цих двох групах також

усереднювалися. За отриманими таким чином результатами були побудовані відповідні залежності (рис. 3.21).

Таблиця 3.3

Результати експериментальних вимірювань і розрахунків

t, хв	Verbatium model # 52019 9 W (8,4)*		ТЛЦ 03-01-10-003 УХЛ 4 10 Вт (9,5)*		МЕЙ-E27-10 Вт (9,4)*		$\frac{F_{4н} + F_{5н} + F_{6н}}{3}$, В.ОД				
	F ₄ , ЛМ	F _{4н} В.ОД	F ₅ , ЛМ	F _{5н} , В.ОД	F ₆ , ЛМ	F _{6н} , В.ОД					
0	479	Температура. на корпусі. 68°C	1,140	254	Температура на корп.. 67,7°C	1,210	910	Температура на корп.. 67,8°C	1,070	1,163	Середнє значення температури на корпусі 67,8°C
5	456		1,086	236		1,124	880		1,035	1,090	
10	445		1,060	223		1,062	848		1,021	1,060	
15	430		1,024	220		1,048	840		1,012	1,041	
20	423		1,007	216		1,029	830		1,006	1,020	
25	422		1,002	213		1,014	815		1,003	1,012	
30	421		1,001	211		1,005	808		1,002	1,005	
35	420:		1,000:	210:		1,000:	802		1,001	1,000:	
40	420		1,000	210		1,000	800:		1,000:	1,000	
45	420		1,000	210		1,000	800		1,000	1,000	

*в дужках наведено значення реально виміряних потужностей.

: жирним виділено номінальні значення світлових потоків досліджуваних ретрофiтних НДС.

Таблиця 3.4

Результати експериментальних вимірювань і розрахунків

t, хВ	Philips Master LED Bulb MV 8 W (7,35)*		SW-101-7 W 190-240 V 7 W (6,6)*		TLF BL 133 10 W (Telefunken) (9,9)*		$\frac{F_{1н} + F_{2н} + F_{3н}}{3}$, В.ОД.			
	F ₁ , ЛМ	F _{1н} , В.ОД	F ₂ , ЛМ	F _{2н} , В.ОД	F ₃ , ЛМ	F _{3н} , В.ОД				
0	472	Температура на корп. 64,8 °С	1,073	550	Температура на корп. 64,7°С	1,100	920	Температура. на корп. 65 °С	1,070	1,081
5	461		1,048	533		1,066	890		1,035	1,050
10	457		1,036	529		1,056	878		1,021	1,037
15	453		1,024	520		1,034	870		1,012	1,021
20	449		1,020	511		1,022	865		1,006	1,016
25	446		1,014	508		1,016	861		1,001	1,007
30	443		1,007	504		1,008	860		1,000:	1,005
35	441		1,002	502		1,004	860		1,000	1,002
40	440:		1,000:	500:		1,000:	860		1,000	1,000:
45	440	1,000	500	1,000	860	1,000	1,000			

*в дужках наведено значення реально виміряних потужностей.

: жирним виділено номінальні значення світлових потоків досліджуваних ретрофiтних НДС.

Аналіз даних табл. 3.3 та 3.4 показав, що при падінні світлового потоку під час перехідного процесу від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим більше ніж на 10 %, температура *p-n* переходу НДС перевищує допустимі значення, що прискорює процес деградації параметрів виробу, в тому чис-

лі і СТС. Спад світлового потоку більше ніж на 10 % разом з температурою корпусу близько 65°C і більше дає підставу критично відноситися до заявленої виробником СТС світлотехнічного виробу.

В процесі аналізу графічних залежностей (рис. 3.21) з'ясувалося, що динаміка перехідного процесу спаду нормованого світлового потоку НДС (F_H) від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим ($F_H = 1$) добре описується різницею падаючої (перший доданок у виразі (3.23)) і зростаючої (другий

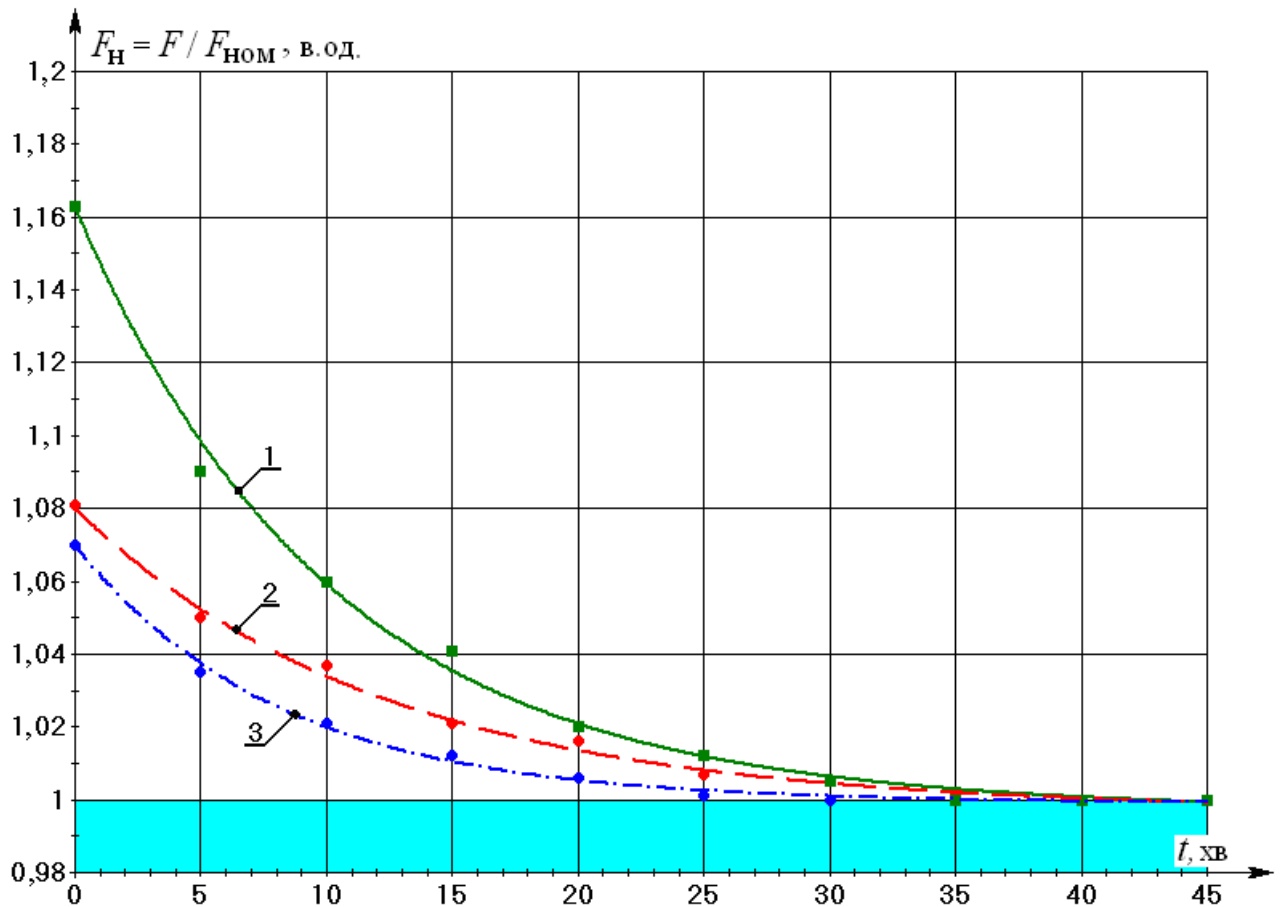


Рис. 3.21. Динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим: 1 – для НДС 4, 5, 6; 2 – для НДС 1, 2, 3; 3 – для НДС 3

доданок у виразі (3.23)) вільних складових – експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування

$$F_H = 1 + a \cdot \exp(-t/\tau_1) - b \cdot [1 - \exp(-t/\tau_2)], \quad (3.23)$$

де a – коефіцієнт, який визначає величину початкового нормованого значення світлового потоку НДС при кімнатній температурі p - n переходу в момент ввімкнення в мережу (стала інтегрування першого перехідного процесу);

b – коефіцієнт, який визначає динаміку перехідного процесу спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим (стала інтегрування другого перехідного процесу);

τ_1, τ_2 – сталі часу складових перехідного процесу спаду світлового потоку НДС від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим;

t – біжучий час, хв.

З формули (3.23) можна зробити висновок про те, що за динаміку процесу охолодження $p-n$ переходу відповідає два однакових за призначенням процеси. Перший залежить від теплового опору між основою (алюмінієвою або мідною) світлодіоду і радіатором, а другий – від теплового опору між радіатором і оточуючим середовищем. Величину першого опору можна зменшити за рахунок розташування між основою світлодіодів і поверхнею радіатора різного роду теплопровідних паст, а другого – за рахунок підвищення ефективності радіаторів: на основі застосування теплових труб, обдування вентилятором, вибору більш оптимальної конфігурації тощо [178, 179].

З вище викладеного випливає, що для визначення оптимального значення номінального струму розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів (ретрофітних ламп, світильників різного роду тощо) з точки зору забезпечення необхідної величини СТС, необхідно зняти динаміку перехідного процесу спаду світлового потоку як мінімум для п'яти, рівномірно віддалених один від одного значень струму із рекомендованого в нормативно-технічній документації діапазону. За отриманими даними побудувати залежність відносного спаду світлового потоку від струму. Далі з отриманої залежності вибрати таке значення струму, при якому спад світлового потоку не перевищує 10 %. Саме цей струм слід взяти в якості номінального [180].

Аналіз взаємозв'язку між прямим падінням напруги і довжиною хвилі максимуму випромінювання НДС (табл. 3.2, рис. 3.22) показав, що сучасні технології не дозволяють виготовляти світлодіоди з однозначно стабільними параметрами навіть в одній партії. Відхилення від типових значень прямого па-

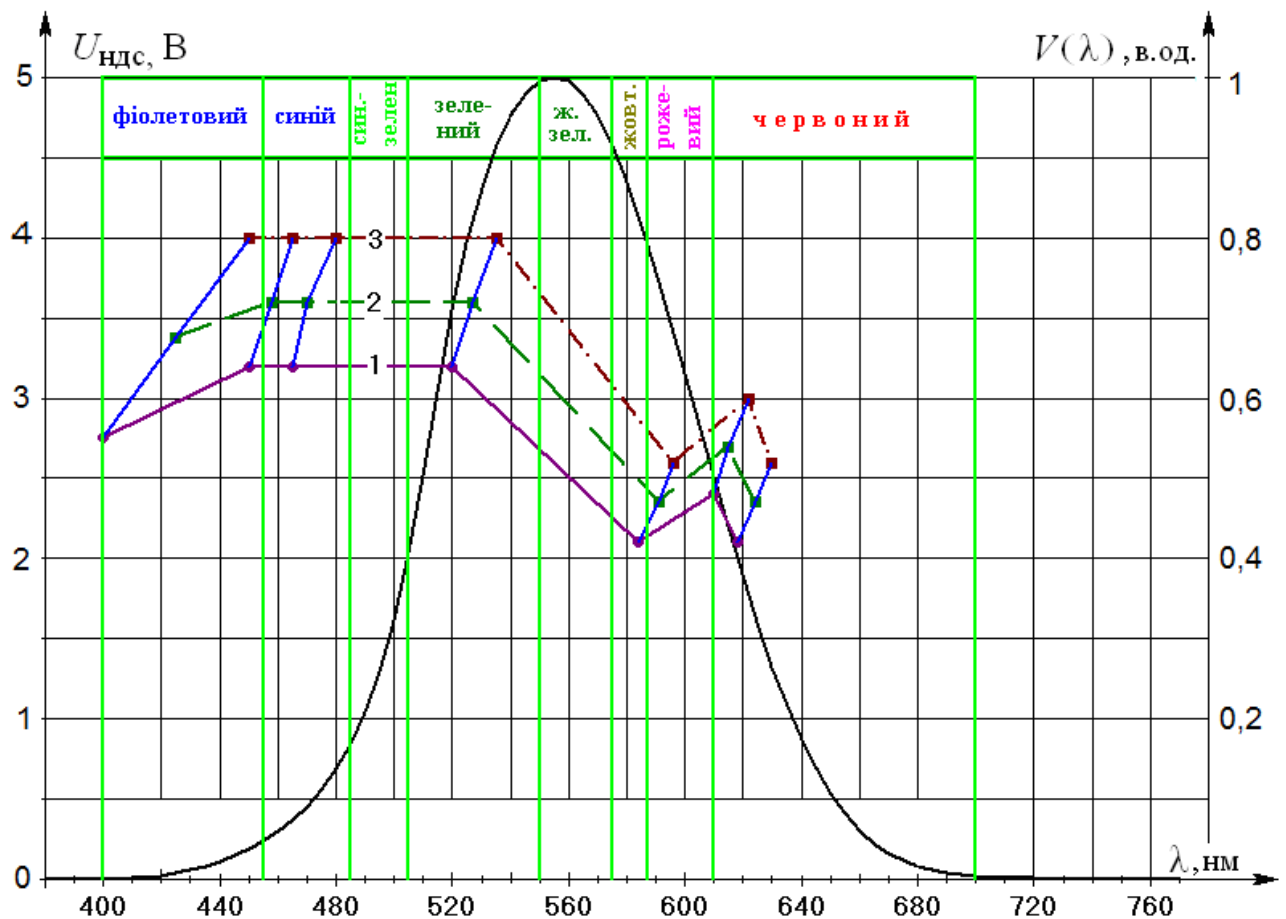


Рис. 3.22. Взаємозв'язок між прямим падінням напруги (1 – мінімальним, 2 – типовим і 3 – максимальним) і довжиною хвилі максимуму випромінювання напівпровідникових джерел світла на прикладі світловипромінюючих діодів фірми GREE (круглих, овальних, SMD та серії P4) [175, 150]

діння напруги на світлодіодах, довжини хвилі максимуму випромінювання, сили світла для певних кутів випромінювання (табл. 3.1) досить значні. Тому підприємства вимушені займатися розбіновкою світлодіодів за напругою, кольоровою температурою, світловим потоком, яскравістю, силою світла та індексом кольоропередачі, що призводить до подорожання кінцевої продукції [181].

3.8. Висновки з розділу 3

1. Отримано функціональні залежності динаміки світового потоку джерел світла в процесі експлуатації, що дозволило визначати кількість світлової енергії, генерованої за будь-який наперед заданий проміжок часу.

2. Встановлено, що при димеруванні теплових джерел світла ЛАТРоm коефіцієнт пульсації світлового потоку зменшується, а симісторним регулятором – зростає.

3. Експериментально доведено, що будь-який спосіб димерування ЛЛ і КЛЛ в мережі частотою 50 Гц, чи то ЛАТРоm, чи то симісторним регулятором, призводить до зростання коефіцієнта пульсацій світлового потоку.

4. Доведено, що зростання КПСП у кольорових ЛЛ обумовлено не лише зменшенням сталої складової світлового потоку, але й збільшенням глибини пульсацій випромінювання.

5. Доповнено наукові дані поняттям просторових пульсацій світлового потоку, які виникають в приміщеннях при застосуванні двох-чотирьох лампових світильників з розщепленою фазою. Це дало можливість сформулювати вимоги для раціонального їх розміщення.

6. Експериментально доведено, що серед існуючих типів розрядних ламп високого тиску лише лампи типу ДНаТ можуть бути рекомендовані для застосування в схемах регулювання світлового потоку.

7. На основі аналізу та узагальнення отриманих нами експериментальних даних запропонована система рівнянь (3.15) – (3.19) для визначення електричних та світлотехнічних параметрів НДС, що дозволило визначитися з енергоефективністю їхнього димерування.

8. Встановлено, що світловипромінюючі діоди є єдиним з існуючих джерел світла, у яких при розгоранні відбувається падіння як світлового потоку, так і світлової віддачі, а при димеруванні – зростання світлової віддачі.

9. Уперше доведено, що динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку напівпровідникових джерел світла від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим з достатньою для практики точністю описується різницею падаючої й зростаючої експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування, що дає можливість оцінювати вклад кожного з теплових опорів (основа світлодіод-радіатор, радіатор-оточуюче середовище) в процес тепловідводу надлишкового тепла в оточуюче середовище від драйвера та світлодіодів.

10. Доведено, що спад світлового потоку під час перехідного процесу від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим в межах до 10 % вказує на те, що при такому тепловому режим світлотехнічного виробу середня тривалість світіння світлодіодів буде близькою до заявленого у нормативно-технічній документації номінального значення. Перевищення 10 %-ного значення спаду світлового потоку свідчить про наднормативний перегрів *p-n* переходу світлодіодів, при якому як світлова віддача, так і середня тривалість світіння будуть нижче заявлених.

11. Запропоновано методику визначення оптимального значення номінального струму, розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів з точки зору забезпечення необхідної величини середньої тривалості світіння, шляхом дослідження залежності відносного спаду їхнього світлового потоку від струму з моменту ввімкнення до переходу в усталений режим, що унеможливить розроблення і виготовлення неякісної продукції.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

4.1. Розробка системного підходу оцінки енергоефективності джерел світла

Проблема енергоощадності має велике загальносвітове значення. З успішним її вирішенням пов'язане майбутнє людської цивілізації. З одного боку, це обумовлено виснаженням паливо енергетичних ресурсів, а з іншого забрудненням навколишнього середовища викидами в атмосферу шкідливих речовин. Тому, раціональне використання електроенергії та зниження витрат на штучне освітлення є основним завданням глобальної політики сучасності. Для цього необхідно щоб оцінка енергоефективності (сукупності показників, які дають змогу порівнювати різні вироби однакового призначення з точки зору споживання енергії) як джерел світла (ДС), так і освітлювальних установок (ОУ) здійснювалася на основі системного (з точки зору сукупності показників), науково-обґрунтованого підходу. Особливої актуальності це питання набуло у зв'язку з появою напівпровідникових ДС – світлодіодів, які мають не тільки високі світлову віддачу й середню тривалість світіння, але й ціну.

Аналіз фундаментальних, періодичних та нормативних видань [7, 112, 114, 122, 123, 125] показав, що в сучасних нормативних і наукових виданнях оцінка енергоефективності ДС здійснюється на основі використання двох параметрів – потужності і світлового потоку. Порівнюють або світлові віддачі ДС (відношення світлового потоку до потужності (лм/Вт)), або класи енергоефективності (A, B, C, D, E, F, G), які визначають за додатними, однозначними, лінеаризованими, обернено параболічними функціями (1.6; 1.7; 1.8) [7]. При цьому можна з впевненістю стверджувати, що в теперішній час навіть для ДС загального призначення ще не склалася система єдиних критеріїв, які б можна було запропонувати для порівняльного аналізу їх ефективності. Єдиного системного

підходу до оцінки енергоефективності ДС поки що не існує. Більшість науковців, виробників і споживачів ДС вважають, що світлова віддача (клас енергоефективності) – це визначальний показник енергоефективності. Чим він більше, тим краще [50, 114]. Хоча легко собі уявити ДС з великою світловою віддачею класу А, але з дуже малою середньою тривалістю світіння (СТС), високою ціною, великим спадом світлового потоку в процесі експлуатації, високою чутливістю до параметрів оточуючого середовища (температури, вологості), коливань напруги мережі, частоти ввімкнень, великими витратами щодо утилізації, високою вартістю ПРА для них, тощо. Навряд чи таке ДС можна віднести до енергоефективного.

З вище викладеного випливає, що не можна енергоефективність ДС оцінювати одним якимось параметром, а решту (СТС, світловий потік, потужність, ціну) дописувати на етикетку [112].

Саме тому з появою світлодіодних ДС на противагу зазначеним параметрам з'явилися спроби оцінки енергоефективності за вартістю одиниці світлового потоку (грн/лм) [70], відношенням суми повної вартості ОУ та експлуатаційних витрат до добутку світлового потоку на СТС (грн/(лм×год)) [117], за питомою світловою енергією, як відношення виробленої ДС за СТС світлової енергії до потужності ДС (Млм×год/Вт) [8] та за найменшою вартістю експлуатаційних витрат в розрахунку на одну лм×год [50]. Є спроби оцінки енергоефективності ОУ в цілому держав параметром «світлозабезпеченості» – кількості виробленої в державі світлової енергії за рік в розрахунку на одну людину Млм×год/(людина×рік) [7].

Проте жоден з авторів, як було вище зазначено, так і не довів, що запропонований ним підхід до оцінки енергоефективності джерел світла на етапі їхнього вибору за загальнодоступними даними є системним.

Саме тому нашою метою й стало розроблення системного підходу до оцінки енергоефективності на основі ранжування джерел світла за показниками

класу енергоефективності, мінімальних і максимальних світлових віддач, вартості одиниць світлового потоку та одиниць світлової енергії.

Оцінка енергоефективності власне ДС за кожним з вище згаданих показників проводилася нами на основі аналізу каталожних даних та даних Інтернет ресурсів компанії OSRAM [182, 183, 184]. В процесі досліджень була розглянута вся гама існуючих ДС, а саме: 1 – теплові джерела світла (кварцово-галогенні лампи розжарення; 2 – напівпровідникові ДС (світлодіоди); 3 – трубчасті люмінесцентні лампи; 4 – компактні люмінесцентні лампи; 5 – розрядні лампи високого тиску. Для кожного типу ДС вибиралися лампи з мінімальними H_{\min} і максимальними H_{\max} номінальними світловими віддачами. Мінімальні і максимальні значення вартостей одиниць світлового потоку, світлової енергії та питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої за середню тривалість світіння ДС, визначалися за наступними формулами

$$C_{F \min} = (C_{\text{дс. min}} + C_{\text{ПРА min}}) / F_{H \min}, \quad C_{F \max} = (C_{\text{дс. max}} + C_{\text{ПРА max}}) / F_{H \max}, \quad (4.1)$$

де $C_{F \min}$ ($C_{F \max}$) – мінімальна (максимальна) вартість одиниці світлового потоку ДС, грн/лм;

$C_{\text{дс. min}}$ ($C_{\text{дс. max}}$) – мінімальна (максимальна) вартість ДС, грн;

$F_{H \min}$ ($F_{H \max}$) – номінальний мінімальний (максимальний) світловий потік відповідного ДС, лм.

$C_{\text{ПРА min}}, C_{\text{ПРА max}}$ – мінімальна (максимальна) вартість ПРА (драйвера);

$$C_{q \min} = (C_{\text{дс. min}} + C_{\text{ПРА min}}) / (F_{H \min} \cdot \tau_{\text{дс. min}}), \quad (4.2)$$

$$C_{q \max} = (C_{\text{дс. max}} + C_{\text{ПРА max}}) / (F_{H \max} \cdot \tau_{\text{дс. max}}), \quad (4.3)$$

де $C_{q \min}$ ($C_{q \max}$) – мінімальна (максимальна) вартість одиниці світлової енергії, грн/(Млм × год);

$\tau_{\text{дс. min}}$ ($\tau_{\text{дс. max}}$) – мінімальна (максимальна) СТС ДС, год;

$$C_{qP \min} = (C_{\text{дс. min}} + C_{\text{ПРА min}}) \cdot P_{\text{дс. min}} / (F_{H \min} \cdot \tau_{\text{дс. min}}), \quad (4.4)$$

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

де $P_{\text{дс. min}}$ ($P_{\text{дс. max}}$) – мінімальна (максимальна) потужність ДС, Вт;

$C_{qP \text{ min}}$ ($C_{qP \text{ max}}$) – мінімальна (максимальна) вартість одиниці питомої світлової енергії, виробленої ДС за СТС, грн×Вт/(Млм×год).

Результати вибору мінімальних H_{min} і максимальних H_{max} світлових віддач та розрахунків $C_{F \text{ min}}$ ($C_{F \text{ max}}$), $C_{q \text{ min}}$ ($C_{q \text{ max}}$), $C_{F \text{ min}}$ ($C_{F \text{ max}}$), $C_{qP \text{ min}}$ ($C_{qP \text{ max}}$) за вищеведеними формулами (4.1- 4.5) зведено в табл. 4.1 та табл. 4.2, за якими побудовані відповідні діаграми, представлені на рис. 4.1 та 4.2 [185, 186].

Таблиця 4.1

Показники мінімальних значень світлових віддач H_{min} , вартостей одиниць світлових потоків $C_{F \text{ min}}$, світлових енергій $C_{q \text{ min}}$ та питомих вартостей одиниць світлових енергій, вироблених ДС за середню тривалість світіння $C_{qP \text{ min}}$ (рис. 4.1)

№	Назва ДС	H_{min}	$C_{F \text{ min}}$	$C_{q \text{ min}}$	$C_{qP \text{ min}}$
1	2	3	4	5	6
1	Лампи розжарення SPECIAL A, з термозахистом, грушоподібні	7,40	92,27	92,27	2306,8
2	Кварцово-галогенні лампи класу Р ЕКО	8,89	140,25	70,13	1262,2
3	Кварцово-галогенні лампи класу А ЕКО	9,44	99,00	49,50	891,00
4	Кварцово-галогенні лампи HALOPIN ECO	10,00	119,7	59,85	1197,00
5	Кварцово-галогенні лампи HALOLI-NE для сіткової напруги	14,00	37,85	18,92	1135,4
6	Кварцово-галогенні лампи HALOLUX CERAM ECO	14,75	81,80	40,90	1635,9
7	Кварцово-галогенні лампи HALOSTAR ECO 12 В	15,00	302,76	75,69	529,83
8	Кварцово-галогенні лампи HALOLINE ECO	16,98	44,37	22,18	1064,8
9	Розрядні лампи високого тиску HQL (STANDSRT)	36,00	26,99	19,75	987,38
10	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LEDinestra	41,67	1449,92	120,82	724,90
11	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLASSIC A (2)	45,33	769,56	30,78	92,35
12	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLAS-SIC GLOBE	45,34	1098,68	43,94	131,82
13	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLAS-SIC A	45,34	769,63	30,78	92,34

Продовження таблиці 4.1					
1	2	3	4	5	6
14	КЛЛ DULUX SUPERSTAR MINI GLOBE	48,00	298,08	19,87	99,36
15	КЛЛ DULUX STAR MINI TWIST	50,00	119,96	15,00	74,98
16	КЛЛ ULUXSTAR STICK	50,00	133,68	13,37	66,84
17	КЛЛ DULUX INTELLIGENT LONG-LIFE	54,00	124,07	6,20	31,02
18	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення PARANHOM CLAS-SIC B	54,40	680,88	27,24	68,09
19	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLAS-SIC P	54,40	769,63	30,79	76,96
20	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T2 FM	55,00	351,12	103,65	621,88
21	Трубчасті люмінесцентні лампи SA T12	60,00	54,17	31,51	630,26
22	КЛЛ DULUX SUPERSTAR MICRO TWIST	60,00	143,69	44,10	308,69
23	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення PARANHOM CLASSIC A ADVANCED	62,67	488,55	16,28	122,13
24	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T8	65,00	74,94	13,84	138,43
25	КЛЛ DULUX L LUMILUX	66,67	35,32	27,22	489,96
26	КЛЛ OSRAM DULUX T/E PLUS	69,23	122,33	12,23	159,03
27	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX X XT T8	75,00	94,21	5,68	102,18
28	Натрієві лампи високого тиску VIALOX NAV - E SUPER 4Y	76,00	32,81	4,41	220,46
29	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HO CONSTANT	79,17	38,44	13,7	328,81
30	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HO	83,33	15,00	9,95	238,79
31	Металогалогенні лампи високого тиску з кварцовими пальниками POWERSTAR HQI - TS	90,00	30,94	2,95	2952,8
32	Безелектродні високоефективні люмінесцентні лампи типу ENDURA ($f_m=250$ кГц)	92,86	343,17	10,08	705,49
33	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HE	96,43	21,43	17,65	247,08
34	Металогалогенні лампи високого тиску з керамічними пальниками POWERBALL HCI - T	100,00	90,07	17,13	599,72
35	Металогалогенні лампи високого тиску з кварцовими пальниками POWERSTAR HQI - E	105,00	14,39	2,00	800,52

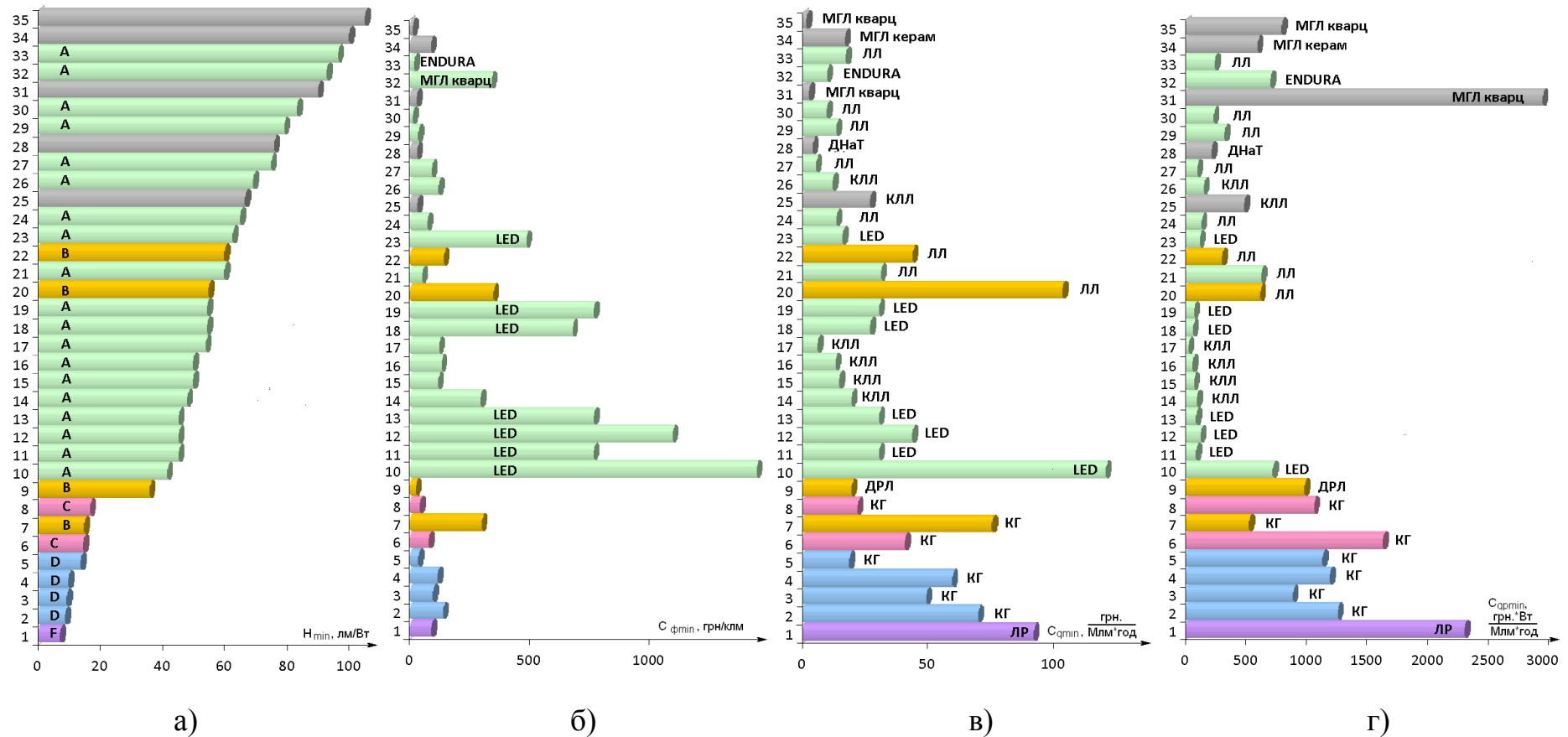


Рис. 4.1. Діаграми оцінки енергоефективності існуючої гаи ДС, представлених в табл. 4.1, за наступними мінімальними показниками: а) світлових віддач і класів енергоефективності від А до G; б) вартостей одиниць світлового потоку, розрахованих за виразом (4.1); в) вартостей одиниць світлової енергії, розрахованих за виразом (4.2); г) питомих вартостей одиниць світлової енергії, виробленої за середню тривалість світіння ДС, розрахованих за виразом (4.4). На діаграмах по осях абсцис відкладені значення зазначених вище показників енергоефективності. По осях ординат проставлені номери, які відповідають назвам ДС, представлених в табл. 4.1

Таблиця 4.2

Показники максимальних значень світлових віддач H_{\max} , вартостей одиниць світлових потоків $C_{F\max}$, світлових енергій $C_{q\max}$ та питомих вартостей одиниць світлових енергій, вироблених ДС за середню тривалість світіння $C_{qP\max}$ (рис. 4.2)

№	Назва ДС	H_{\max}	$C_{F\max}$	$C_{q\max}$	$C_{qP\max}$
1	2	3	4	5	6
1	Кварцово-галогенні лампи класу Р ЕКО	13,81	38,69	19,34	812,48
2	Кварцово-галогенні лампи HALO-PIN ECO	16,33	24,43	12,21	732,86
3	Лампи розжарення SPECIAL A, з термозахистом, грушоподібні	16,80	2,03	2,03	1016,07
4	Кварцово-галогенні лампи класу А ЕКО	18,10	8,86	4,43	465,04
5	Кварцово-галогенні лампи HALO-LUX CERAM ECO	20,49	11,49	5,75	1177,77
6	Кварцово-галогенні лампи HALO-LINE для сіткової напруги	22,00	0,72	0,36	722,50
7	Кварцово-галогенні лампи HALO-LINE ECO	22,50	4,02	2,01	803,56
8	Кварцово-галогенні лампи HALO-STAR ECO 12 В	27,50	19,27	4,82	289
9	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LEDinestra	41,67	1449,92	120,82	724,9
10	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLASSIC GLOBE	45,34	1098,68	43,94	131,82
11	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення PARANHOM CLASSIC B	55,56	578,44	23,14	104,11
12	Розрядні лампи високого тиску HQL (STANDSRT)	57,00	14,75	2,15	2146,77
13	КЛЛ DULUX SUPERSTAR MINI GLOBE	58,00	74,83	4,99	99,77
14	КЛЛ DULUX STAR MINI TWIST	63,04	23,00	2,88	66,13
15	КЛЛ ULUXSTAR STICK	64,67	17,64	1,76	52,93
16	КЛЛ DULUX INTELLIGENT LONGLIFE	64,67	18,14	0,91	27,22
17	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLASSIC A	65,00	290,51	11,62	116,20
18	КЛЛ DULUX SUPERSTAR MIC-RO TWIST	69,57	46,76	29,46	677,59
19	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLASSIC P	71,43	618,6	24,74	86,60
20	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T2 FM	71,54	131,35	37,34	485,44
21	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення PARANHOM CLASSIC A ADVANCED	72,76	402,4	13,41	194,49
22	Трубчасті люмінесцентні лампи SA T12	73,85	17,97	8,25	536,07
23	КЛЛ OSRAM DULUX T/E PLUS	76,19	42,04	4,20	176,57
24	Безелектродні високоефективні люмінесцентні лампи типу ENDURA ($f_m=250$ кГц)	80,00	216,16	7,02	1052,28
25	Світлодіодні лампи прямої заміни ламп розжарення LED STAR CLASSIC A (2)	81,00	232,94	9,32	93,18
26	КЛЛ DULUX L LUMILUX	81,25	9,30	5,21	416,87

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6
27	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HO CONSTANT	85,00	14,37	4,55	363,72
28	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HO	87,50	6,25	2,92	233,97
29	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T8	88,57	8,23	5,11	357,54
30	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX X XT T8	89,66	28,17	1,52	88,35
31	Металогалогенні лампи високого тиску з кварцовими пальниками POWERSTAR HQI - E	100,00	12,35	1,60	1596,85
32	Металогалогенні лампи високого тиску з кварцовими пальниками POWERSTAR HQI - TS	102,50	14,30	1,47	2938,35
33	Металогалогенні лампи високого тиску з керамічними пальниками POWERBALL HCI - T	104,00	32,84	4,03	1008,17
34	Трубчасті люмінесцентні лампи LUMILUX T5 HE	104,29	10,33	6,65	232,67
35	Натрієві лампи високого тиску VIALOX NAV - E SUPER 4Y	138,75	3,30	0,49	194,87

Умовно ДС, зображені на діаграмах рис. 4.1,а та рис. 4.2,а за величиною світлових віддач можна розбити на три групи: 1 – низькоефективні з 1 по 8 номери з усередненими світловими віддачами $H_{\min.cp}=12$ лм/Вт (рис. 4.1) і $H_{\max.cp}=19,7$ лм/Вт (рис. 4.2); 2 – середньої ефективності з 9 по 22 номери з усередненими світловими віддачами $H_{\min.cp}=54,7$ лм/Вт (рис. 4.1) і $H_{\max.cp}=62,4$ лм/Вт (рис. 4.2); 3 – високої ефективності з 23 по 35 номери з усередненими світловими віддачами $H_{\min.cp}=81,6$ лм/Вт (рис. 4.1) і $H_{\max.cp}=99,4$ лм/Вт (рис. 4.2). В той час, як за класами енергоефективності (від F до A) всі ДС, починаючи з номера 10 на рис. 4.1 і номера 9 на рис. 4.2 відносяться в основному до кл. А. Таким чином, між оцінкою енергоефективності ДС за величиною світлової віддачі та класами енергоефективності немає належної відповідності. Так до кл. А відносяться СДЛПЗ (№ 10 у табл. 4.1) з $H_{\min.}=41,67$ лм/Вт, а ЛЛ з більшою світловою віддачею (№ 20 у табл. 4.1) $H_{\min.}=55,0$ лм/Вт відносяться до кл. В. Така ж сама ситуацію спостерігається і для ДС № 10 і № 22, № 9 і № 22 (рис. 4.1), а також для ДС № 9 і № 22, № 10 і № 27 (рис. 4.2). До кл. В відносяться як кварцово-галогенні ЛР (№ 7 у табл. 4.1) з $H_{\min.}=15,0$ лм/Вт, так і КЛЛ (№ 22 у табл. 4.1) з значно більшою світловою віддачею $H_{\min.}=60,0$ лм/Вт.

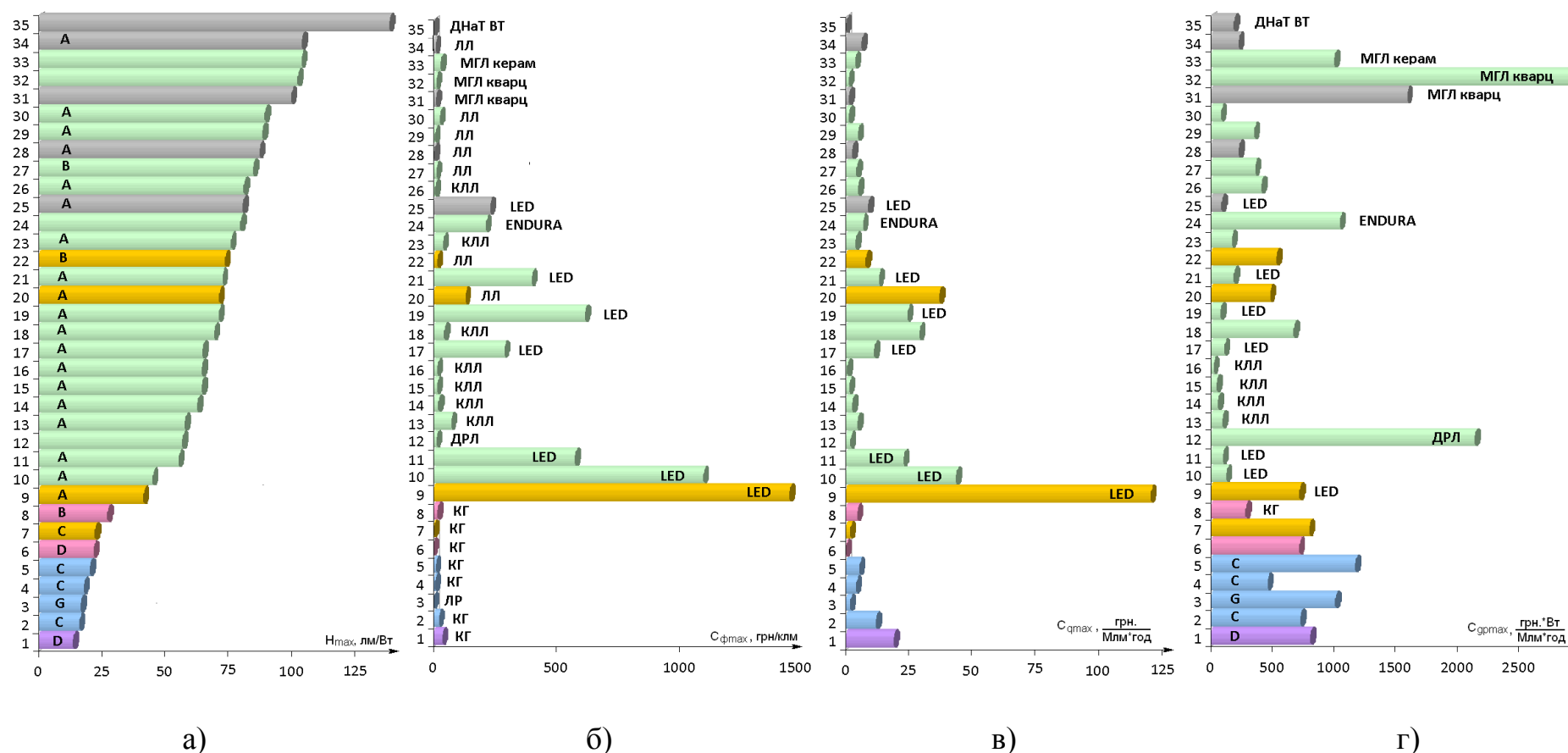


Рис. 4.2. Діаграми оцінки енергоефективності існуючої гами ДС, представлених в табл. 4.2, за наступними максимальними показниками: а) світлових віддач і класів енергоефективності від А до G; б) вартостей одиниць світлового потоку, розрахованих за виразом (4.1); в) вартостей одиниць світлової енергії, розрахованої за виразом (4.2); г) питомих вартостей одиниць світлової енергії, виробленої за середню тривалість світіння джерела світла, розрахованих за виразом (4.5). На діаграмах по осях абсцис відкладені значення зазначених вище показників енергоефективності. По осях ординат проставлені номери, які відповідають назвам ДС, представлених в табл. 4.2

Таблиця 4.3

Вихідні дані до розрахунків, наведених в табл. 4.1 та табл. 4.2

Мінімальні значення до табл. 4.1					Максимальні значення до табл. 4.2				
№	P, Вт	СТС, год	Ціна ДС, грн	Ціна ПРА, грн	№	P, Вт	СТС, год	Ціна ДС, грн	Ціна ПРА, грн
1	25,0	1 000	17,07	—	1	42,0	2 000	22,44	—
2	18,0	2 000	22,44	—	2	60,0	2 000	23,94	—
3	18,0	2 000	16,83	—	3	500,0	1 000	17,07	—
4	20,0	2 000	23,94	—	4	105,0	2 000	16,83	—
5	60,0	2 000	31,79	—	5	205,0	2 000	48,26	—
6	40,0	2 000	48,26	—	6	2000,0	2 000	31,79	—
7	7,0	4 000	31,79	—	7	400,0	2 000	36,16	—
8	48,0	2 000	36,16	—	8	60,0	4 000	31,79	—
9	50,0	12 000	48,59	377,96	9	6,0	12 000	362,48	—
10	6,0	12 000	362,48	—	10	3,0	25 000	149,42	—
11	3,0	25000	104,66	—	11	4,5	25 000	144,61	—
12	3,0	25 000	149,42	—	12	1000,0	12 000	840,54	627,85
13	3,0	25 000	104,67	—	13	20,0	15 000	86,8	—
14	5,0	15 000	71,54	—	14	23,0	8 000	33,35	—
15	5,0	8 000	29,99	—	15	30,0	10 000	34,23	—
16	5,0	10 000	33,42	—	16	30,0	20 000	35,20	—
17	5,0	20 000	33,50	—	17	10,0	25 000	188,83	—
18	2,5	25 000	92,60	—	18	23,0	12 000	74,81	490,83
19	2,5	25 000	104,67	—	19	3,5	25 000	154,65	—
20	6,0	12000	115,87	294,57	20	13,0	12000	—	294,57
21	7,0	12 000	60,35	161,91	21	14,5	30 000	424,53	—
22	20,0	12 000	65,00	388,79	22	65,0	12 000	86,25	388,79
23	7,5	30 000	229,62	—	23	42,0	10 000	134,53	—
24	10,0	15 000	48,71	86,26	24	150,0	60 000	2593,9	2457,04
25	18,0	15 000	42,38	447,58	25	10,0	25000	188,68	—
26	13,0	10 000	110,10	—	26	80,0	15 000	60,48	447,58
27	18,0	75 000	127,18	447,58	27	80,0	20000	97,72	520,61
28	50,0	30 000	124,68	377,96	28	80,0	24 000	43,75	447,58
29	24,0	20000	73,03	447,58	29	70,0	15 000	51,0	424,02
30	24,0	24 000	30,00	447,58	30	58,0	75 000	146,5	447,58
31	1000,0	12 000	2784,6	404,42	31	1000,0	12 000	1234,5	681,67
32	70,0	60 000	2230,58	1700	32	2000,0	12 000	2932,50	681,67
33	14,0	20 000	28,93	447,58	33	250,0	12 000	853,77	404,42
34	35,0	12 000	315,24	404,42	34	35,0	20 000	37,7	447,58
35	400,0	12 000	604,24	404,42	35	400,0	30 000	183,28	627,85

При оцінці енергоефективності ДС з точки зору вартості одиниці світлового потоку (рис. 4.1,б і 4.2,б) з'ясувалося, що СДЛПЗ за цим параметром є найгірші, хоча й відносяться до найвищого класу енергоефективності А та мають досить високі світлові віддачі. Найкращими за цим параметром виявилися всі решта ДС, в тому числі і ТДС, які як за світловими віддачами, так і за кла-

сами енергоефективності є найгіршими. Це обумовлено низькою вартістю ДС і не потрібністю будь-якого ПРА для них (табл. 4.3).

При оцінці енергоефективності ДС з точки зору вартості одиниці світлової енергії (рис. 4.1,в і 4.2,в), виробленої ними за середню тривалість світіння, ситуація дещо змінилася. Особливо яскраво це проявилось на діаграмах мінімальних вартостей одиниць світлової енергії (рис. 4.1,в). ТДС перейшли в розряд низькоефективних ДС, а решта – до високоефективних. В тому числі і СДЛПЗ (за виключенням № 10) та ЛЛ (за виключенням № 20), у яких найвищі вартість комплекту ДС+ПРА – 362,48 грн та $(115,87+284,57 = 400,44)$ грн) згідно табл. 4.3 відповідно.

Оцінка енергоефективності за питомою вартістю одиниці світлової енергії, виробленої ДС за СТС (рис. 4.1,г та 4.2,г) показала, що лампи розжарення загального призначення є найгіршими, трохи кращими є КГЛР. Найкращими виявилися СДЛПЗ, КЛЛ і ЛЛ. Серед розрядних ламп високого тиску – ДНаТ і металогалогенні лампи з кварцовим пальником, крім металогалогенної лампи POWERDALL HCl – Т під № 31 на рис. 4.1,г та № 32 на рис. 4.2,г. Низька енергоефективність розрядних ламп POWERDALL HCl обумовлена виключно високою вартістю як власне ламп (2784,62 грн для № 31 та 2932,50 грн для № 32), так і необхідної для них ПРА (404,42 грн для № 31 та 681,67 грн для № 32) (див. табл. 4.3).

Таблиця 4.4
Витрати в процентному відношенні до загальної вартості СДЛПЗ

Найменування	Витрати від загальної вартості, %
Високоякісний драйвер	31
Світлодіоди	23
Оплата праці	18
Радіатор	16
Пластикові колба	7
Друкована плата для НДС	5

Слід зазначити, що хоча СДЛПЗ і є одними з найкращих ДС, високого попиту на них не спостерігається. Основним стримуючим фактором є висока ціна (в середньому \$ 13). У зв'язку з цим нами були проведені дослідження щодо наявності реальних можливостей її зниження. Аналіз вартості комплектуючих і трудовитрат фірми CREE, а

також даних, наведених в [187], показав (табл. 4.4), що в першу чергу потрібно зменшувати вартість драйверів і світлодіодів. Їхня частка у вартості ретрофитних ламп складає 54 %. Здійснити це при високих вимогах до вихідних характеристик драйверів і мільярдних об'ємах виробництва світлодіодів буде вкрай важко. Тому потрібно поступово відійти від концепції виробництва світлодіодних ДС і перейти до виробництва світлодіодних світлових приладів різного призначення. Високі значення СТС є основою для здійснення такого кроку.

4.2. Енергоефективність регулювання світлового потоку на прикладі теплових і напівпровідникових джерел світла

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що в теперішній час не можна працювати за принципом «поставив і забув» [87, 94, 124, 186, 187, 188]. Головним, що може призвести до радикального збільшення енергоефективності освітлення, є не тільки зменшення загальної встановленої потужності освітлювальних установок за рахунок переходу до високоефективних джерел світла, але й зниження загального споживання електроенергії [189 – 192]. Цього можна досягнути лише за рахунок впровадження інтелектуальних систем управління освітленням. ОУ чи її частини повинні вмикатися тільки тоді, коли це дійсно необхідно. При цьому вони повинні забезпечувати необхідний рівень освітленості (яскравості) з урахуванням впливу спектрального складу джерел світла на роботу присмеркового та нічного зору (S/P-фактора) людини [193]. На теперішній час склалася усталена думка, що регулювання (зменшення) світлового потоку джерел світла автоматично вирішує питання підвищення енергоефективності освітлювальних установок. Та чи так це насправді? З одного боку так, адже величина активної споживаної потужності, хоча й нелінійно, але зменшується. З другого боку існує ще цілий ряд прихованих параметрів, які можуть звести нанівець наші зусилля, якщо не визначити оптимальні межі регулювання світлового потоку.

Саме тому ми провели дослідження енергоефективності регулювання (димерування) світлового потоку ДС на прикладі найменш енергоефективних,

але й досі ще дуже популярних серед населення дешевих ТДС та найбільш енергоефективних, перспективних і дорогих НДС.

Для реалізації поставленої задачі попередньо були проведені дослідження електричних, світлотехнічних і експлуатаційних характеристик теплових та напівпровідникових джерел світла. Для забезпечення відтворюваності дослідів кількість джерел світла кожної із згаданих груп, згідно зі статистичним G-критерієм Кохрена, була прийнята рівною шести [162]. Перед дослідженнями ДС відпалювалися протягом 100 годин в електричній мережі із номінальними параметрами. Дослідження електричних і світлотехнічних характеристик були проведені у фотометричній кулі типу «Everfine Spectron Coating Intergration Sphere».

В результаті експериментальних досліджень були отримані нормовані залежності аналогічні тим, що наведені на рис. 3.20. Залежності нормованих значень СТС теплових ($\tau_{\text{ТДС.н}}$) і напівпровідникових ($\tau_{\text{НДС.н}}$) ДС отримано нами на основі аналізу опублікованих даних [185, 194] та власних експериментальних досліджень щодо впливу на СТС теплових ДС величин діючих значень напруги мережі, а напівпровідникових джерел світла (НДС) – температури p - n переходу (t_n), виражену, для зручності проведення розрахунків, через діючі значення струму (I_n) $t_n = 0,58 \cdot I_n + 0,418$ на основі екстраполяції даних короткочасних (6 тис. годин) випробувань про деградацію світлового потоку з часом в залежності від температури p - n переходу. Отримані графічні залежності представлені на рис. 4.3 були описані аналітично наступними рівняннями

$$\tau_{\text{ТДС.н}} = -186,11 \cdot U_n^3 + 546,24 \cdot U_n^2 - 538,34 \cdot U_n + 178, \quad (4.6)$$

$$\tau_{\text{НДС.н}} = 0,998 \cdot (0,58 \cdot I_n + 0,418)^{-3,22}, \quad (4.7)$$

де $\tau_{\text{ТДС.н}} = \tau_{\text{ТДС}} / \tau_{\text{ТДС.ном}}$ – нормована СТС теплових ДС;

$\tau_{\text{НДС.н}} = \tau_{\text{НДС}} / \tau_{\text{НДС.ном}}$ – нормована СТС напівпровідникових ДС;

$\tau_{\text{ТДС}}, \tau_{\text{НДС}}, \tau_{\text{ТДС.ном}}, \tau_{\text{НДС.ном}}$ – біжуча та номінальна СТС теплових та напівпровідникових ДС відповідно. Для лампи РІЛА 60 $\tau_{\text{ТДС.ном}} = 1\,000$ год, для кварцово-галогенних ламп – 2 000 год, а для НДС $\tau_{\text{НДС.ном}} = 25\,000$ год;

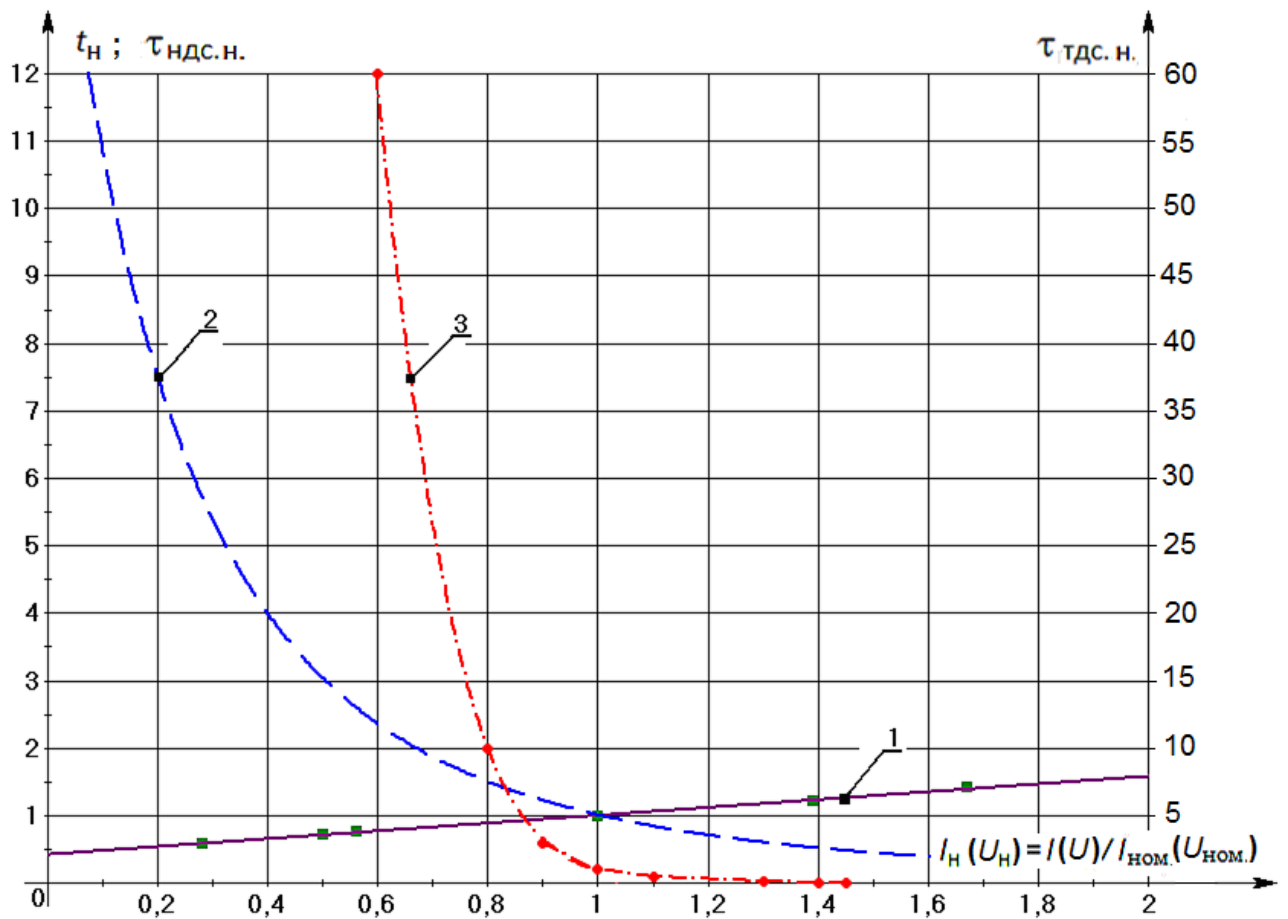


Рис. 4.3. Залежність нормованих значень: 1 – температури (t_n) p - n переходу НДС від нормованого струму I_n ; 2 – СТС ($\tau_{\text{ндс}}$) НДС від нормованого струму I_n та 3 – СТС ТДС ($\tau_{\text{тдс}}$) від нормованої напруги U_n

$U_n = U / U_{\text{ном}}$, $I_n = I / I_{\text{ном}}$ – нормована напруга на теплових ДС і струм через напівпровідникові ДС відповідно;

U , $U_{\text{ном}}$, I , $I_{\text{ном}}$ – біжуча та номінальна напруга на теплових ДС і струм через напівпровідникові ДС відповідно.

Нормування згаданих залежностей дозволило перевести рівняння (4.6 – 4.7) в ранг універсальних – дійсних для розрахунків істинних значень СТС, світлових потоків, потужностей, струмів та напруг існуючої гами теплових і напівпровідникових ДС. При цьому досить легко перейти від нормованих до істинних значень відповідних величин шляхом помноження нормованих значень на номінальні.

Аналіз отриманих залежностей показав, що зменшення світлового потоку ТДС завжди призводить до зменшення їхньої світлової віддачі. Це пояснюється

тим, що інтенсивність спаду світлового потоку при зменшенні напруги мережі (крива 4 на рис. 3.20) завжди більша, ніж потужності ТДС (крива 3 на рис. 3.20). При перевищенні напруги мережі номінального значення (координати (1;1) на рис. 3.20) світловий потік (крива 4 на рис. 3.20) починає заростати скоріше, ніж потужність (крива 3 на рис. 3.20), що і обумовлює зростання світлової віддачі ТДС.

Регулювання світлового потоку НДС супроводжується прямо протилежними процесами. При зменшенні струму через НДС (рис. 3.20) світлова віддача зростає. При збільшенні струму – зменшується. Це вказує на доцільність експлуатації НДС при занижених, по відношенню до номінального значення, струмах.

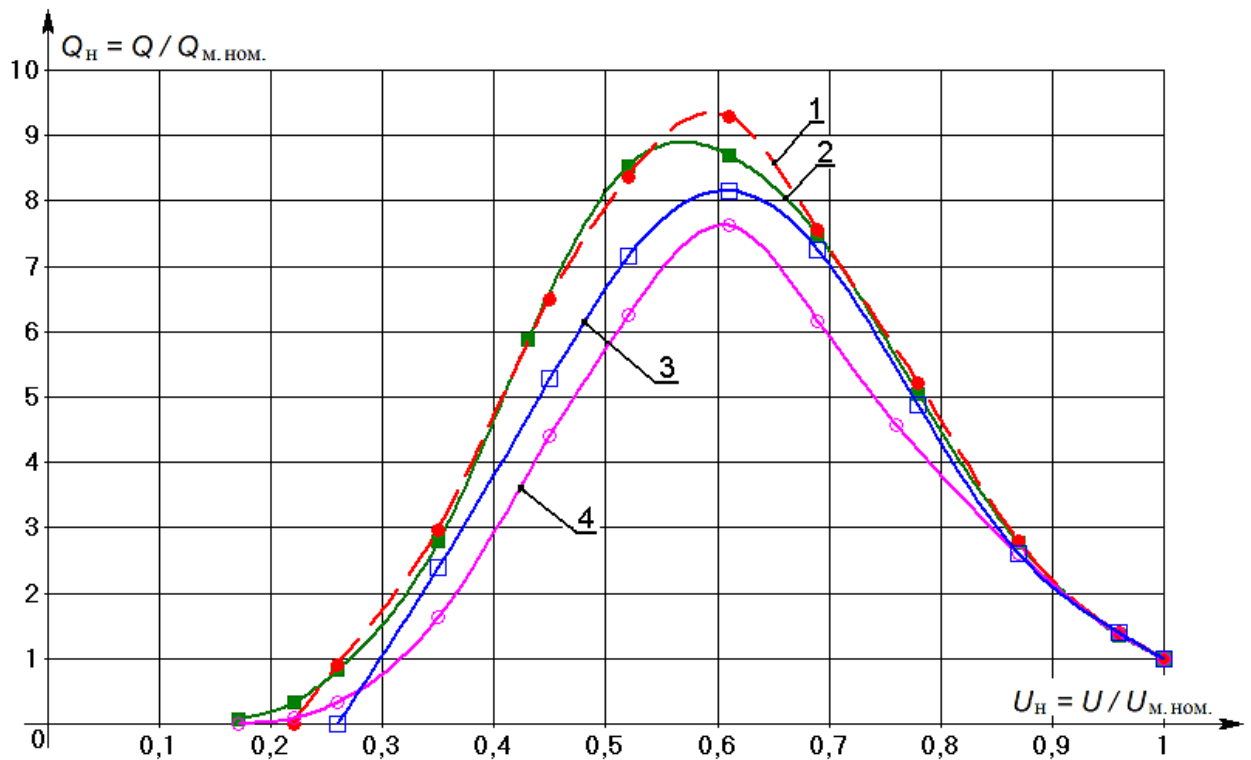
СТС джерел світла незалежно від принципу їхньої роботи при зменшенні світлового потоку зростає, а при збільшенні – падає (криві 2 і 3 на рис. 4.3). Це обумовлено відповідними змінами швидкості випаровування вольфраму у ТДС, та температури *p-n* переходу у НДС. При цьому швидкість змін нормованих значень світлового потоку, потужності і СТС у ТДС помітно перевищує швидкість відповідних змін у НДС.

Спираючись на отримані експериментальні дані (вирази (4.6), (4.7), (3,17-3.22)) були проведені розрахунки щодо кількості виробленої нормованої світлової енергії Q_n тепловими та напівпровідниковими ДС (рис. 4.4) за СТС за наступною формулою

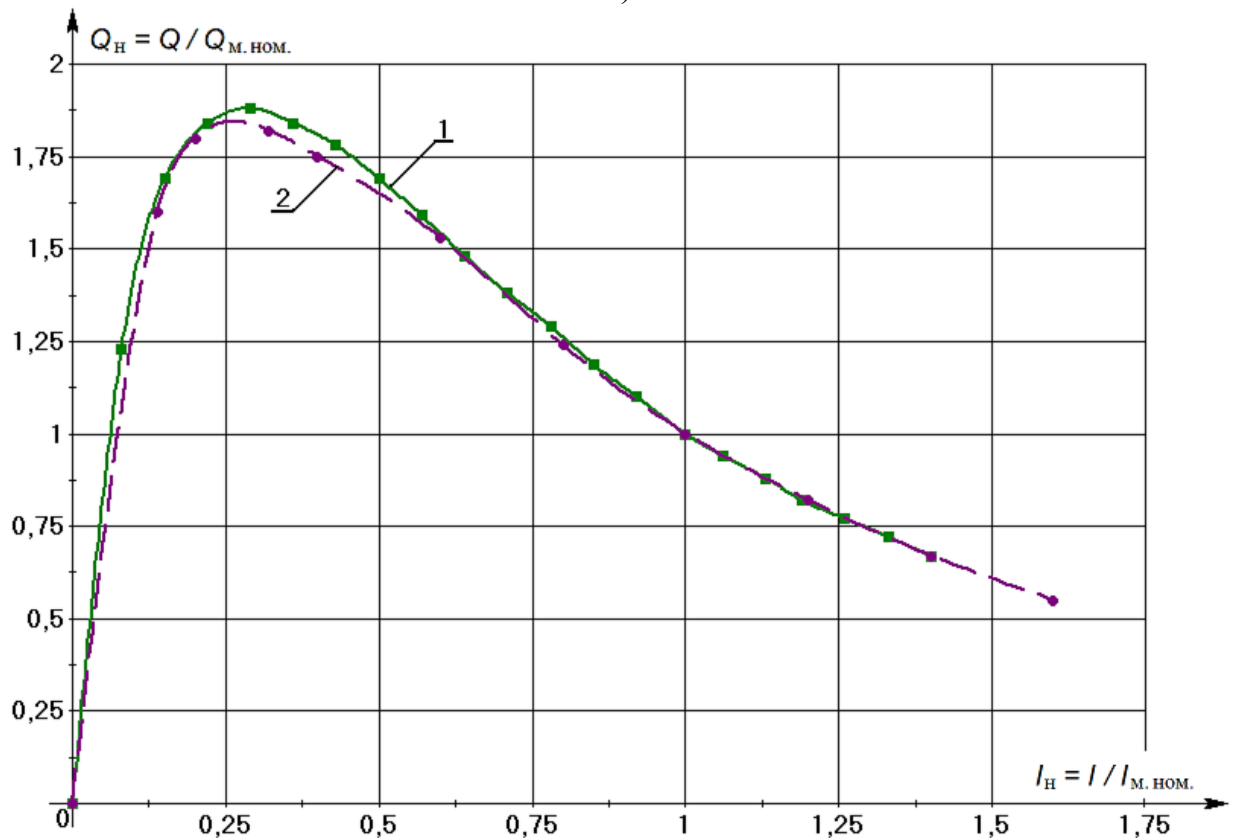
$$Q_n = Q / Q_{\text{ном}} = F \cdot \tau / (F_{\text{ном}} \cdot \tau_{\text{ном}}). \quad (4.8)$$

Результати цих розрахунків наведені на рис. 4.4,а та 4.4,б відповідно.

Аналіз рис. 4.4,а та 4.4,б показав, що кількість виробленої світлової енергії в процесі зменшення напруги на ТДС та струму через НДС спочатку поступово зростає, а потім зменшується, проходячи через максимум при певних значеннях напруги мережі для ТДС і певних значеннях струму через НДС. Для ТДС максимум знаходиться в області $U_n = 0,6 \cdot U_{\text{ном}}$, а для НДС – в області $I_n = 0,25 \cdot I_{\text{ном}}$. При цьому максимальна кількість нормованої світлової енергії, виробленої тепло-



a)



б)

Рис. 4.4. Залежність нормованої кількості світлової енергії, виробленої ТДС та НДС за СТС в процесі регулювання світлового потоку: а) ТДС: 1 – КГ 42=55 Вт; 2 – КГ XENON 42=60 Вт; 3 – КГ 28=35 Вт; 4 – ЛР PILA 60 Вт; б) НДС: 1 – світильника з 42 СД загальною потужністю 15,5 Вт; 2 – PARATHOM CLASSIC GLOBE 10,5 Вт

вими ДС PILA 60 Вт, перевищує (приблизно у $7,65/1,86=4,1$ раз) відповідну кількість світлової енергії, виробленої НДС. Це обумовлено меншими значеннями номінальних СТС (у НДС номінальна СТС у 25 разів менша ніж у НДС) і більш інтенсивним зростанням нормованих значень СТС теплових ДС в процесі регулювання світлового потоку у порівнянні НДС $\tau_{\text{ТДС.Н}} / \tau_{\text{НДС.Н}} = 60 / 2,35 = 25,5$. В абсолютних величинах різниці між ними практично немає. Так при $U_{\text{н}} = 0,6$ для НДС $\tau_{\text{ТДС}} = \tau_{\text{ТДС.Н}} \cdot \tau_{\text{ТДС.НОМ}} = 60 \cdot 1000 = 60\,000$ год, а при $I_{\text{н}} = 0,6$ для НДС $\tau_{\text{НДС}} = \tau_{\text{НДС.Н}} \cdot \tau_{\text{НДС.НОМ}} = 2,35 \cdot 25000 = 58750$ год.

Це ж відноситься і до абсолютних значень максимальної кількості виробленої світлової енергії. Так, якщо НДС PARATHOM CLASSIC GLOBE 10,5 Вт при $I_{\text{н}} = 0,29$ в точці з координатами (0,29; 1,88) за СТС виробить $Q = Q_{\text{н}} \cdot Q_{\text{м.н}} = 1,88 \cdot (F_{\text{НДС.НОМ}} \cdot \tau_{\text{НДС.НОМ}}) = 1,88 \cdot (470 \cdot 25000) = 22,90$ Млм×год світлової енергії, то теплове ДС PILA 60 Вт, для заміни якого згадане НДС і було створено, виробить при $U_{\text{н}} = 0,6$ в точці з координатами (0,6; 7,65) всього – $Q = Q_{\text{н}} \cdot Q_{\text{м.н}} = 7,65 \cdot (F_{\text{ТДС.НОМ}} \cdot \tau_{\text{ТДС.НОМ}}) = 7,65 \cdot (594 \cdot 1000) = 4,544$ Млм×год світлової енергії. Тобто не більше в 4,1 рази, як це характерно для нормованих значень, а менше в $22,90/4,544 = 5,04$ рази.

Отримані дані дають можливість визначити діапазон значень аргументів, при яких кількість виробленої світлової енергії ДС буде максимальною. Це важливо, але не достатньо для того, щоб визначити енергоефективність ДС на етапі їхнього вибору і в процесі експлуатації як в стаціонарному, так і динамічному режимі світіння. Тому розрахунок енергоефективності ДС ми пропонуємо проводити на основі використання системного підходу щодо визначення енергоефективності джерел світла, викладеного в [194]. Він ґрунтується на визначенні питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої ДС за СТС як на етапі його вибору, так і в процесі експлуатації з урахуванням вартості ДС, тарифу на електроенергію, спаду світлового потоку ДС в процесі експлуатації та вартості, мінімально необхідної для нормальної роботи ДС, пускорегулювальної апаратури (драйвера) за наступними формулами

$$C_{qP} = (C_{дс} + C_{ПРА}) \cdot P_{дс} / (F_{ном} \cdot \tau_{дс}), \quad (4.9)$$

$$C_{qP.e.} = [(C_{дс} + C_{ПРА}) + (P_{дс} + \Delta P_{ПРА}) \cdot \tau_{дс} \cdot q] \times \\ \times (P_{дс} + \Delta P_{ПРА}) / (\tau_{дс} \cdot \int_0^{\tau} F(t) dt), \quad (4.10)$$

де $C_{qP}, C_{qP.e.}$ – вартість питомої одиниці світлової енергії, виробленої ДС за СТС на етапі вибору ДС (без врахування втрат потужності в ПРА, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС ($F(t)$) в процесі експлуатації) та при їх врахуванні відповідно, грн×кВт/(Млм×год);

$C_{дс}, C_{ПРА}$ – вартість ДС та ПРА (драйвера) відповідно, грн;

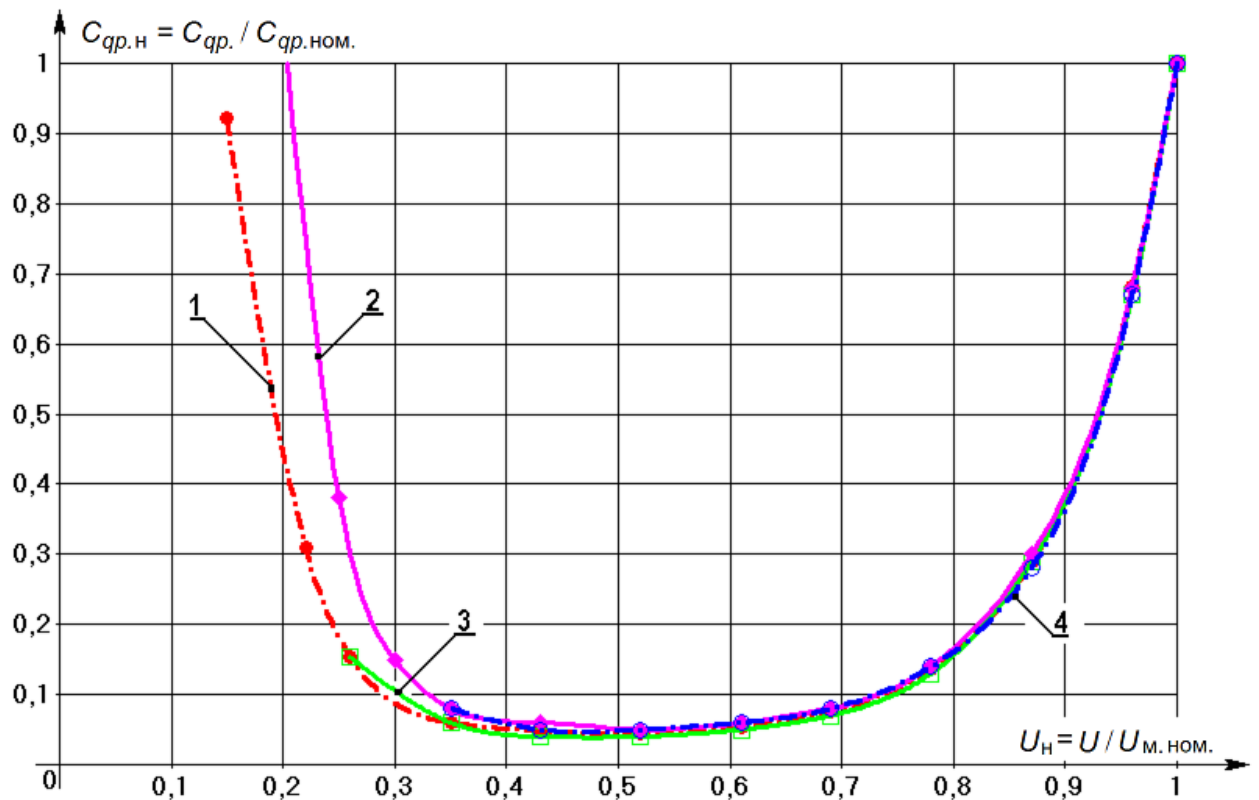
$\Delta P_{ПРА}$ – втрати потужності в ПРА (драйвері), Вт.

За результатами розрахунків за формулами (4.9 і 4.10) побудовані відповідні графіки, наведені на рис. 4.5 та 4.6.

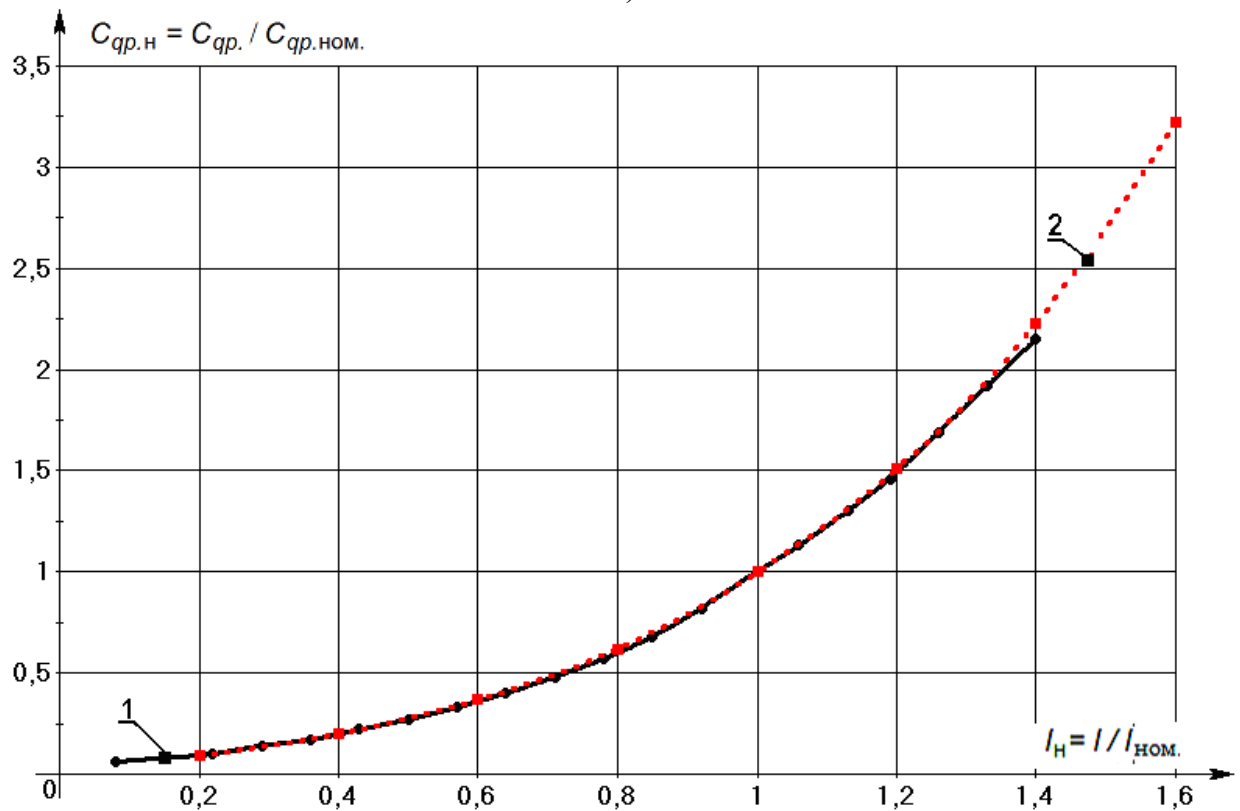
Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що при оцінці енергоефективності регулювання світлового потоку ДС з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої за СТС, за виразом (4.9) характер залежностей визначається типом ДС. На залежностях для ТДС (рис. 4.5,а) можна виділити три характерні ділянки: 1 – різкого збільшення енергоефективності (зменшення величини нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії) в межах $U_n = 1-0,7$; 2 – високої енергоефективності в межах $U_n = 0,70-0,40$ та 3 – різкого падіння енергоефективності в межах $U_n = 0,40-0,15$. Тобто найбільш енергоефективною є друга ділянка.

Для НДС характерно постійне, близьке до експоненціального закону, зростання енергоефективності їхньої експлуатації при збільшенні кратності регулювання світлового потоку аж до повного погасання (рис. 4.5,б).

Врахування втрат в ПРА, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС в процесі експлуатації помітно впливає лише на хід залежностей для ТДС (рис. 4.6,а). Зникає перша ділянка різкого збільшення енергоефективності процесу регулювання світлового по-



а)



б)

Рис. 4.5. Залежність енергоефективності регулювання світлового потоку з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої за СТС: а) ТДС: 1 – КГЛР XENON 42=60 Вт; 2 – ЛР PILA 60 Вт; 3 – КГ 42=55 Вт; 4 – КГЛР 28=35 Вт; б) НДС: 1 – світильника з 42 світлодіодів DURIS E5 загальною потужністю 15,5 Вт; 2 – PARATHOM CLASSIC GLOBE 10,5 Вт

току ($U_n = 1 - 0,7$), за рахунок чого друга ділянка розширюється, охоплюючи діапазон нормованих напруг від $U_n = 1 - 0,40$. Залежність енергоефективності регулювання світлового потоку НДС практично не змінюється (рис. 4.6,б). Вона постійно зростає. З'ясуємо причини цього явища. Для цього на основі розрахунків встановимо співвідношення між частками вартості джерел світла (на основі каталожних даних) і витратами на оплату за електроенергію, спожиту ними протягом номінальної СТС за формулами

$$C_{\text{ел}} = q \cdot (P_{\text{дс.ном}} + \Delta P_{\text{др.}}) \cdot \tau_{\text{дс.ном}}, \quad (4.11)$$

$$C_{\Sigma \text{дс}} = C_{\text{дс}} + C_{\text{ІЗП}} \cdot (\tau_{\text{дс}} / \tau_{\text{ІЗП}}) + C_{\text{др.}} \cdot (\tau_{\text{дс}} / \tau_{\text{др.}}), \quad (4.12)$$

де $C_{\text{ел}}$ – витрати на оплату за електроенергію, спожиту комплектом ДС+ЕмПРА або ДС+ЕПРА, грн;

$\Delta P_{\text{др.}}$ – втрати потужності в баластному дроселі (ЕмПРА), визначалися на основі використання виразу (2.1) за формулою

$$\Delta P_{\text{др.}} = (K_P \cdot P_{\text{дс.ном.}}^{0,615}) / 100, \text{ Вт.} \quad (4.13)$$

де $K_P = 82,63$ – коефіцієнт пропорційності, $\text{Вт}^{0,385}$.

За результатами розрахунків за вище наведеними формулами побудовані відповідні діаграми, представлені на рис. 4.7. Аналіз діаграм показав, що чим менше в загальній сумі витрат (на придбання ДС, мінімально необхідної для його функціонування пускорегулювальної апаратури й оплати за електроенергію протягом середньої тривалості його світіння) частка витрат на сплату рахунків за спожиту електроенергію, тим менше енергоефективність (а значить і доцільність) димерування світлового потоку розглядуваного типу ДС. В першу чергу це відноситься до малопотужних ДС. З ростом потужності енергоефективність димерування для більшості типів ДС зростає.

Найбільша енергоефективність димерування (в порядку падіння енергоефективності) характерна для: 1 – РЛВТ типу ДРЛ; 2 – прямих ЛЛ; 3. – РЛВТ типу ДНаТ; 4 – ЛР загального призначення; 5 – РЛВТ типу ДРІ; 6 – КГЛР; 7 – КЛЛ. В той же час напівпровідникові ДС (особливо малопотужні), світло-

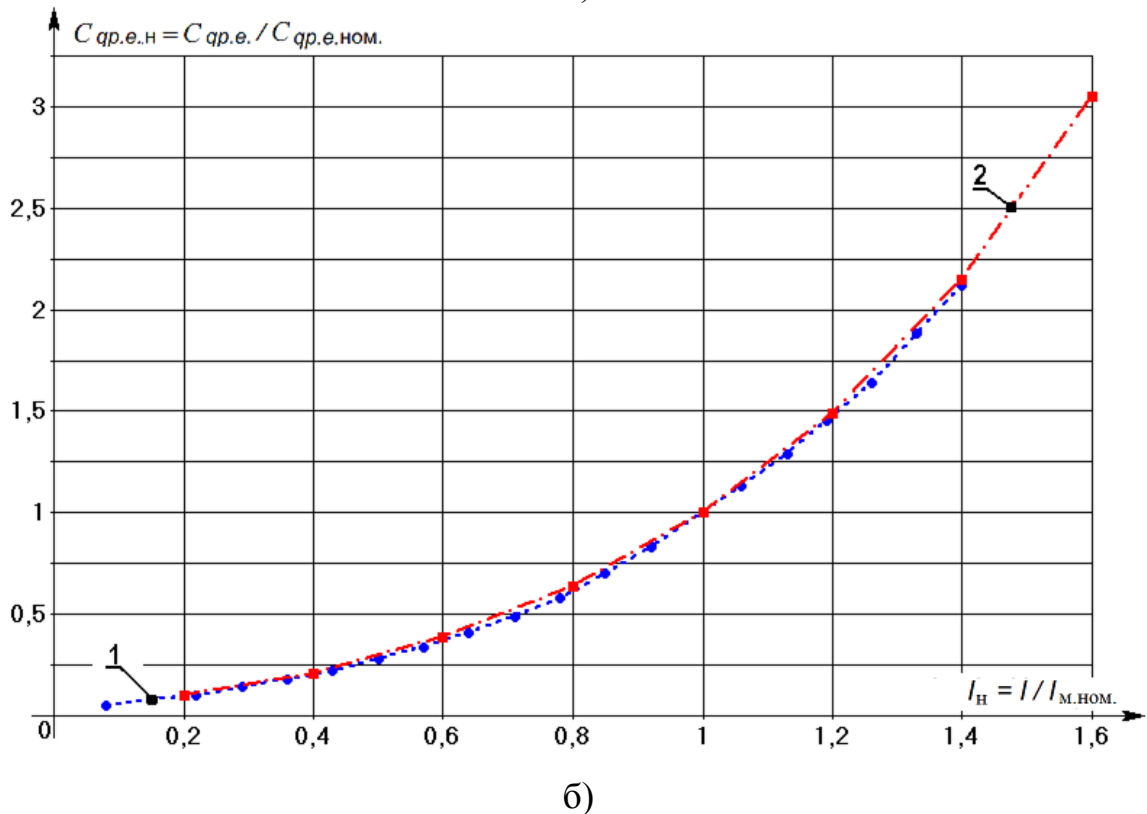
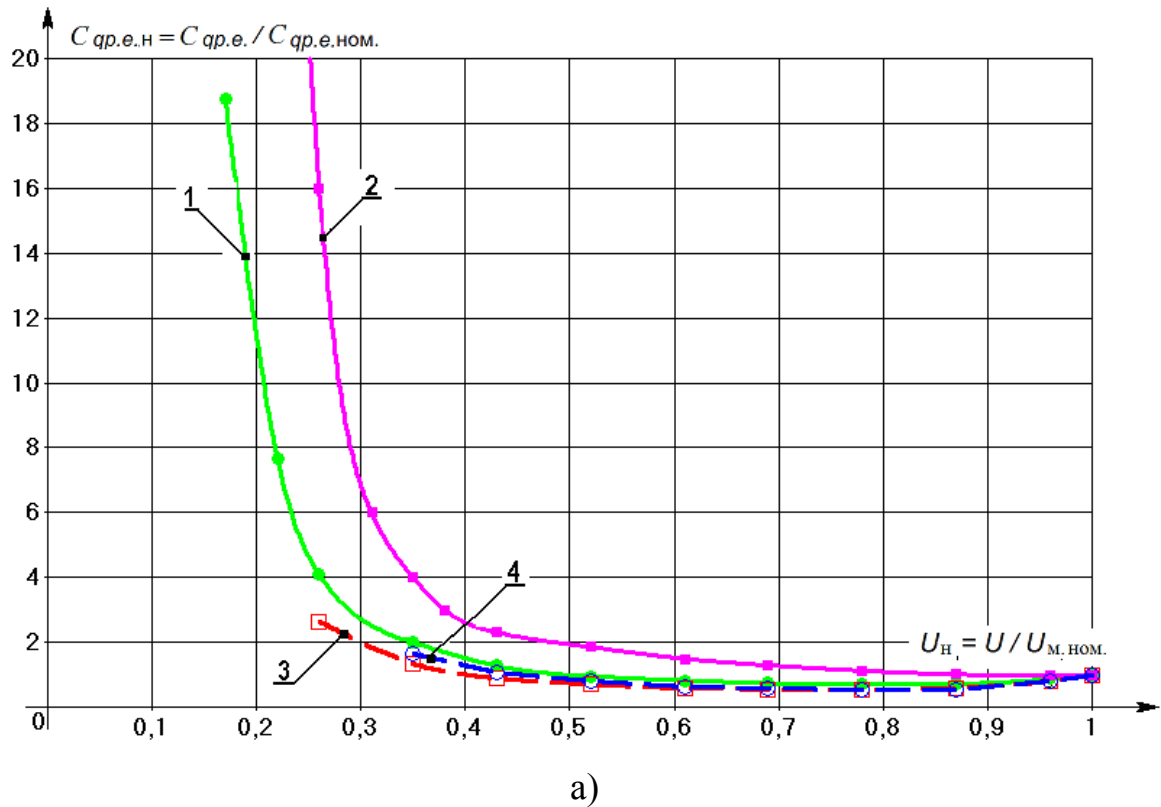


Рис. 4.6. Залежність енергоефективності регулювання світлового потоку з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої ТДС та НДС за СТС в процесі димерування з урахуванням втрат в ПРА, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС в процесі експлуатації: а) ТДС: 1 – КГЛР XENON 42=60 Вт; 2 – ЛР PILA 60 Вт; 3 – КГЛР 42=55 Вт; 4 – КГЛР 28=35 Вт; б) НДС: 1 – світильника з 42 світлодіодів DURIS E5 P = 15,5 Вт; 2 – PARATHOM CLASSIC GLOBE 10,5 Вт

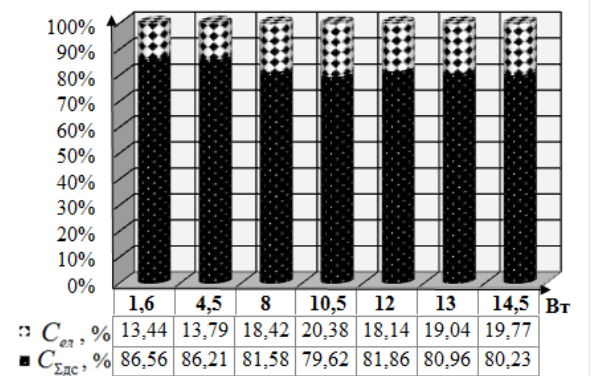
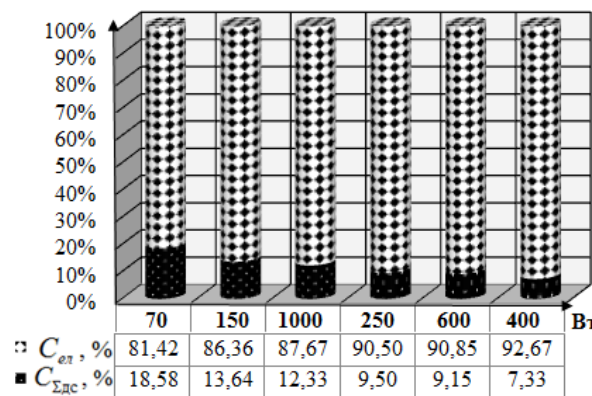
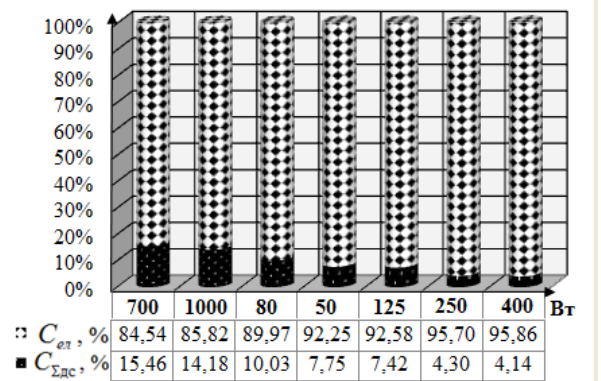
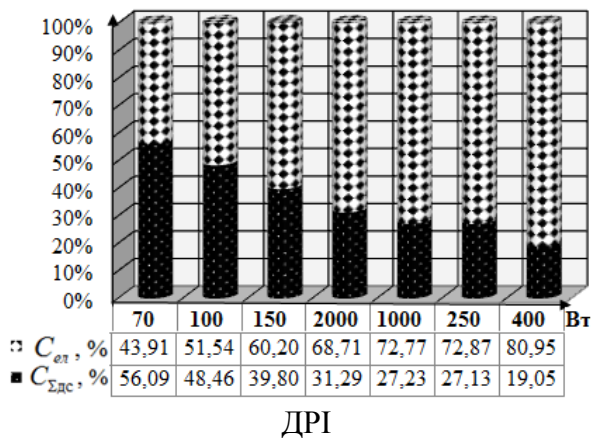
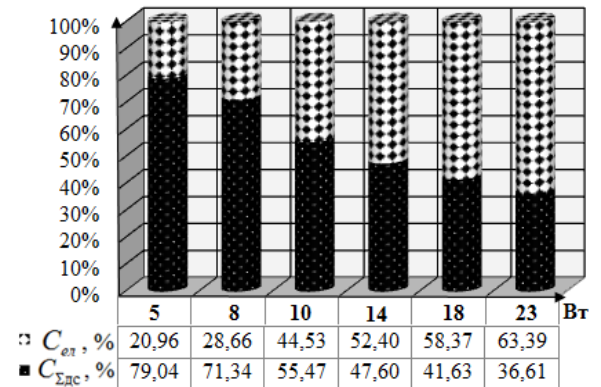
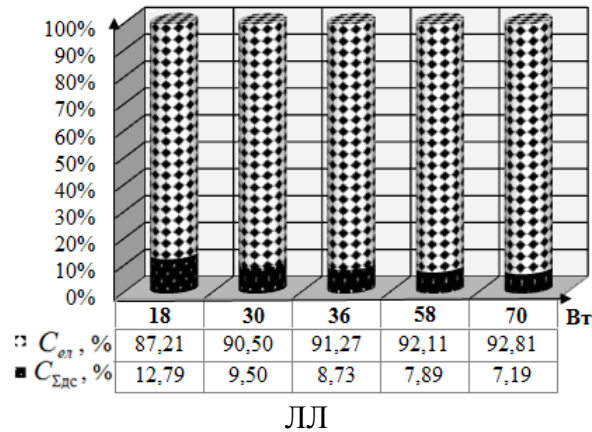
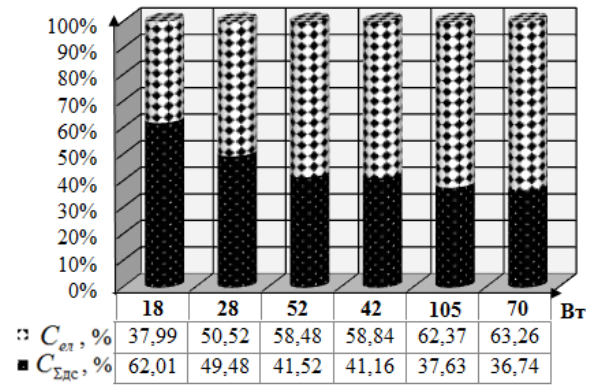
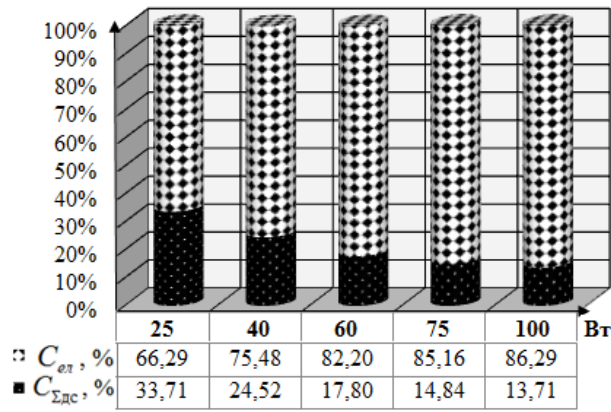


Рис. 4.7. Співвідношення між вартістю ДС і витратами на оплату за електроенергію, спожиту ними протягом номінальної середньої тривалості світіння, для різних за фізичними принципами дії джерел світла

вий потік яких можна легко регулювати від нуля до максимально допустимих значень, з точки зору енергоефективності для плавного димерування рекомендувати не доцільно. Для них найкращий режим роботи – це ввімкнено або вимкнено [195].

Таким чином, якщо залежність енергоефективності регулювання світлового потоку з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої ДС в процесі димерування (рис. 4.5,б та рис. 4.6,б) є постійно падаючою, то такі ДС для димерування не придатні. Їх найкраще експлуатувати в режимі ввімкнено-вимкнено на основі застосування датчиків присутності.

Для розрахунку відносних реалістичних значень економії електричної енергії при застосуванні будь-якого способу регулювання світлового потоку ДС (ОУ) нами запропонований наступний аналітичний вираз

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \int_{t_{i-1}}^{t_i} \gamma_i(t) dt}{\int_0^{t_N} dt} \cdot 100 \%, \quad (4.14)$$

де $\gamma_i(t)$ – математичний вираз, який визначає глибину димерування світлового потоку ДС (ОУ) в межах від 0 до 1 для певного визначеного проміжку часу $\Delta t = t_i - t_{i-1}$. При $\gamma_i(t) = 0$ глибина димерування максимальна, тобто ОУ вимкнена.

Таблиця 4.5

Вихідні дані та результати розрахунків за формулою (4.14)

№ площ на рис. 4.8	Період доби коли працює ОУ	Тривалість роботи ОУ, год $t_N - t_{N-1}$	Димерувальна функція $\gamma_N(t)$	Значення виразу $\int_{t_{N-1}}^{t_N} \gamma_N(t) dt$
1	18:00 – 21:00	3	$\gamma_1(t) = \exp(-t / 1,5)$	1,297
2	21:00 – 24:00	3	$\gamma_2(t) = 1 - \exp(-t / 1,5)$	2,824
3	24:00 – 3:00	3	$\gamma_3(t) = \exp(-t / 4)$	0,471
4	3:00 – 3:00	3	$\gamma_4(t) = 1$	3,00
Всього t_N , год		12	$\sum_{i=1}^N \int_{t_{i-1}}^{t_i} \gamma_i(t) dt$	7,592

При $\gamma_i(t) = 1$ димерування не проводиться, тобто ОУ увімкнена на повну потужність. При $\gamma_i(t) = 0,6$ ОУ генерує 60 % від номінального світлового потоку.

Приклад 1. Нехай ОУ працює з 18:00 год вечора до 6:00 год ранку, тобто $t_N = 12$ год. При цьому проводиться димерування на різних проміжках часу за різними законами, зазначеними в табл. 4.5 і показаними на рис. 4.8.

З таблиці випливає, що

$$E = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \int_{t_{i-1}}^{t_i} \gamma_i(t) dt}{\int_0^{t_N} dt} \right\} \cdot 100 \% = \left\{ 1 - \frac{7,592}{12} \right\} \cdot 100 \% = 36,73 \% .$$

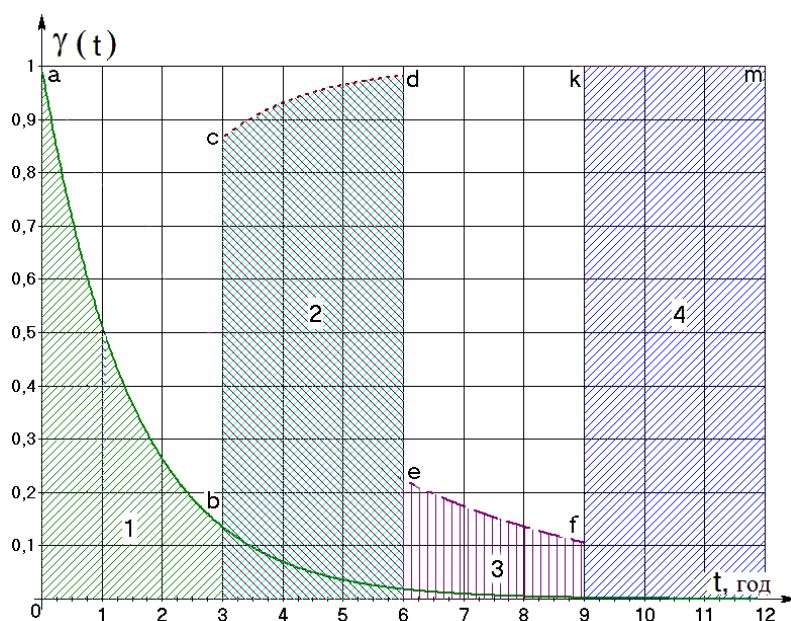


Рис. 4.8. Гістограма роботи ОУ до прикладу 1. Економія електроенергії (відношення не заштрихованої площі до сумарної) складає 36,73 %

саме таким способом регулювання [87].

При димеруванні світлового потоку в ОУ зовнішнього освітлення відчутного енергозаощадження (до 25 %) можна досягнути лише при реалізації глибини регулювання 50 % протягом половини часу роботи ОУ в нічний час (або повного вимкнення ОУ на 3 год), коли інтенсивність дорожнього руху мінімальна. МКО віддає перевагу

4.3. Енергетична ефективність та електромагнітна сумісність існуючих способів регулювання світлового потоку

Найбільш розповсюдженими на теперішній час є симісторні регулятори світлового потоку. Вони були розроблені для димерування виключно ТДС

(див. рис. 4.9,а). З появою НДС в продажі з'явилися і спеціалізовані світлодіодні драйвери: а) які можуть змінювати значення вихідного струму під дією симісторного димера (рис. 4.9,б); б) які мають додатковий вхід керування постійною напругою 0-10 В (рис. 4.9,в); г) DC/DC драйвери із зовнішнім сигналом з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (рис. 4.9,г).

Для визначення відповідності параметрів енергоефективності та електромагнітної сумісності при застосуванні схем димерування, зображених на рис. 4.9,а, рис. 4.9,б; рис. 4.9,в та рис. 4.9,г вимогам існуючих нормативно-технічних документів нами були зняті в процесі димерування ЛР потужністю 100 Вт і НДС потужністю 15,5 Вт наступні експериментальні залежності: а) динаміку нормованих значень активної і реактивної потужності (рис. 4.10); б) динаміку коефіцієнта корисної дії (рис. 4.11); в) динаміку коефіцієнта потужності (рис. 4.12); г) динаміку емісії вищих гармонік (рис. 4.13);

Аналіз отриманих залежностей показав, що при застосуванні симісторного димера (рис. 4.9,а) на фоні поступового зменшення активної потужності P_n спостерігається зростання реактивної потужності спотворень $W_{н.сп}$, вмісту вищих гармонік (I_N / I_Σ , рис. 4.13,а), що і обумовлює падіння коефіцієнта потужності (рис. 4.12,а) та ККД (рис. 4.11) схеми.

Застосування симісторної схеми димерування з спеціалізованим світлодіодним драйвером призводить до ще більш інтенсивного зростання реактивної потужності спотворень (рис. 4.10,б), емісії вищих гармонік (рис. 4.13,б) в споживаному струмі та більш суттєвого падіння КП (рис. 4.12,б) та ККД (рис. 4.11).

При застосуванні спеціалізованого світлодіодного драйвера з додатковим входом для керування постійною напругою 0-10 В (рис. 4.9,в) та інтегрального імпульсного DC/DC драйвера із зовнішнім сигналом ШІМ (рис. 4.9,г) ситуація суттєво покращується. Реактивна потужність спотворень (рис. 4.10,в та рис. 4.10,г), а відповідно і вміст вищих гармонік (рис. 4.13,в та рис. 4.13,г) різко зменшуються. КП (рис. 4.12,в) і ККД (рис. 4.12,г) в широкому діапазоні димерування від $\gamma=1$ до $\gamma=0,5$ зберігають високі значення. КП в схемі рис. 4.9,в при $\gamma=1$ дорівнює 0,91, а в схемі рис. 4.9,г – 0,98. При $\gamma=0,5$ – 0,86 і 0,89

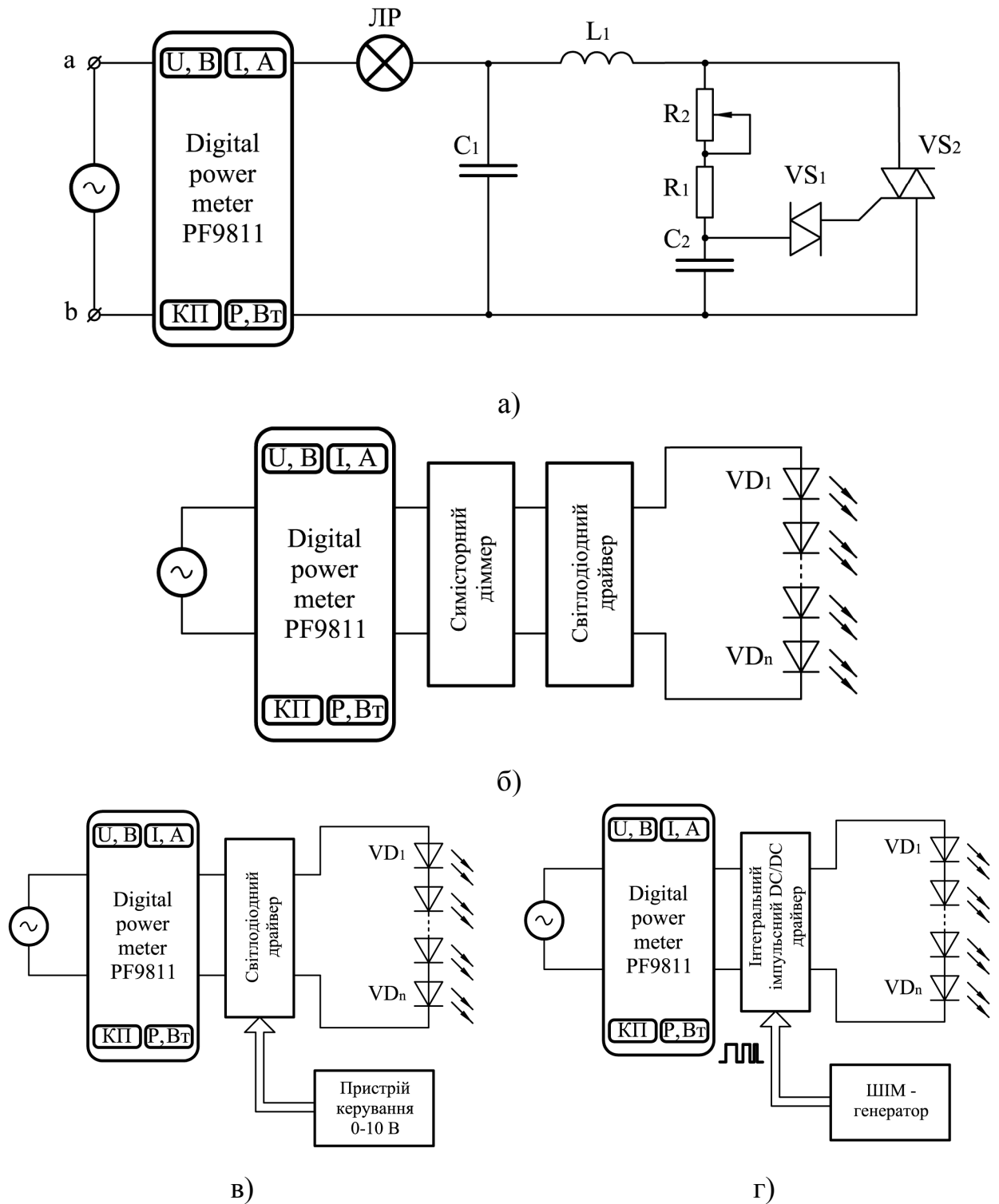


Рис. 4.9. Схеми димерування ДС: а) симісторна; б) симісторна з спеціалізованим світлодіодним драйвером; в) спеціалізований світлодіодний драйвер з додатковим входом для керування постійною напругою 0-10 В; г) інтегральний імпульсний DC/DC драйвер із зовнішнім сигналом з широтно-імпульсною модуляцією

відповідно. При $\gamma = 0,1 - 0,81$ і $0,50$ відповідно. ККД в схемі рис. 4.9,в при $\gamma = 1$ дорівнює $0,83$, а в схемі рис. 4.9,г – $0,84$. При $\gamma = 0,5 - 0,78$ і $0,75$ відповідно. При $\gamma = 0,1 - 0,64$ і $0,36$ відповідно.

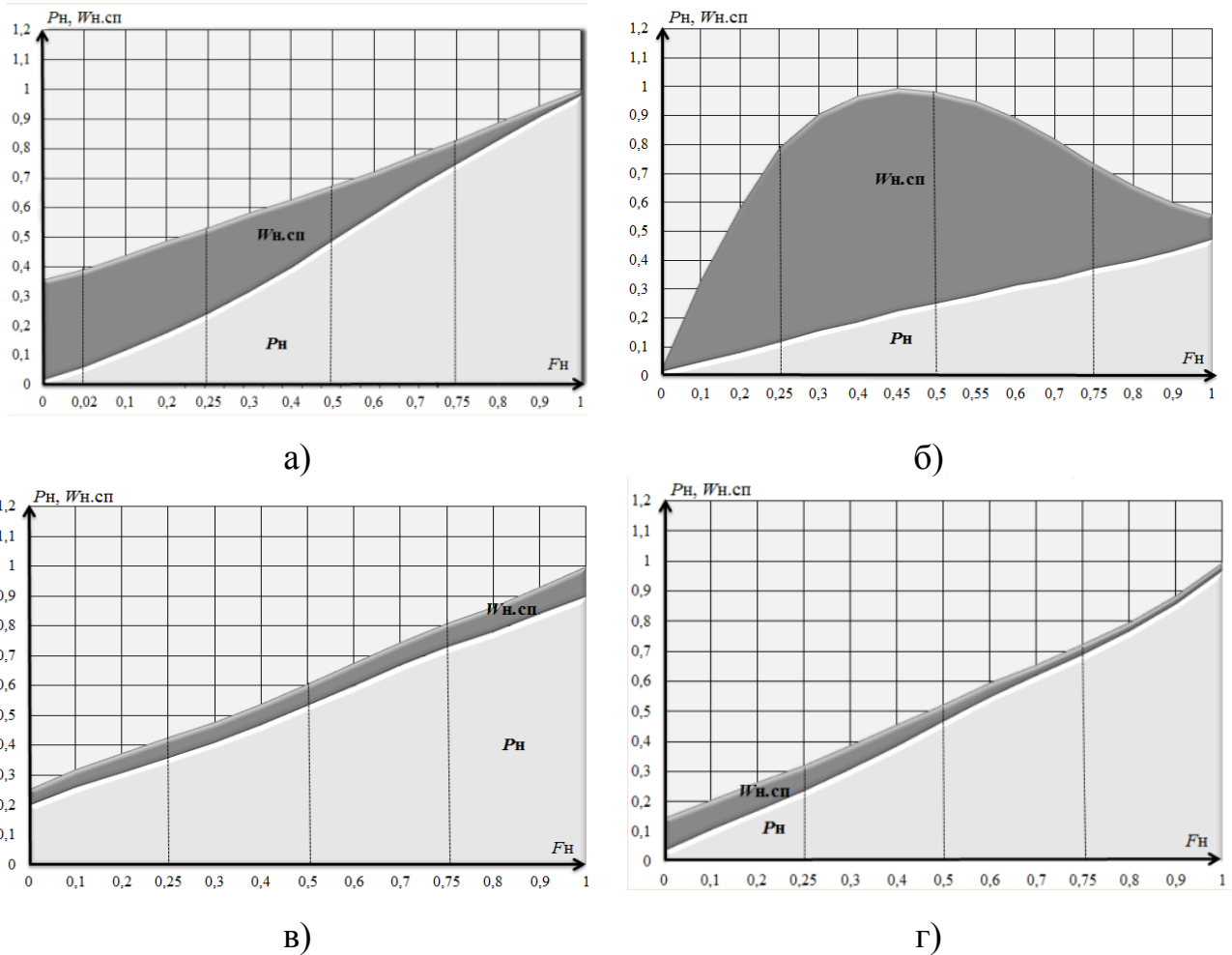


Рис. 4.10. Динаміка нормованої активної (P_n) та реактивної ($W_{n.sp}$) потужностей спотворень в процесі димерування: а) ТДС симістором в схемі рис. 4.9,а; б) НДС симістором через спеціалізований світлодіодний драйвер в схемі рис. 4.9,б; в) НДС спеціалізованим світлодіодним драйвером з додатковим входом для керування постійною напругою 0-10 В в схемі рис. 4.9,в; г) НДС інтегральним імпульсним DC/DC драйвером із зовнішнім сигналом з широтно-імпульсною модуляцією в схемі рис. 4.9,г

При димеруванні РЛВТ за допомогою ЛАТРа коефіцієнт потужності з лампами типу ДРІ практично не змінюється (рис. 3.11,а), з лампами типу ДРЛ слабо зростає (рис. 3.16,а), з лампами типу ДНаТ – зростає (рис. 3.13,а; рис. 3.15,а). ККД схем ввімкнення вище перерахованих РЛВТ практично не змінюється.

Слід також зазначити, що димерування ТДС за допомогою ЛАТРа не призводить до зменшення не тільки КП, але й ККД. Не спостерігається й емісії вищих гармонік.

З вищевикладеного випливає, що серед існуючих ДС теплові і напівпро-

відникові ДС найкращим чином пристосовані для регулювання світлового потоку від нуля до номінального і вище номінального значень. Для ТДС найкращим, з точки зору енергоефективності та електромагнітної сумісності, є спосіб, оснований на зниженні напруги живлення за допомогою автотрансформаторів та спеціалізованих, з вмонтованими коректорами коефіцієнта потужності, регуляторів світлового потоку.

Для НДС потрібно використовувати спеціалізовані світлодіодні драйвери з додатковим входом для керування постійною напругою 0-10 В (рис. 4.9,в) або інтегральні імпульсні DC/DC драйвери із зовнішнім сигналом з широтно-імпульсною модуляцією (рис. 4.9,г).

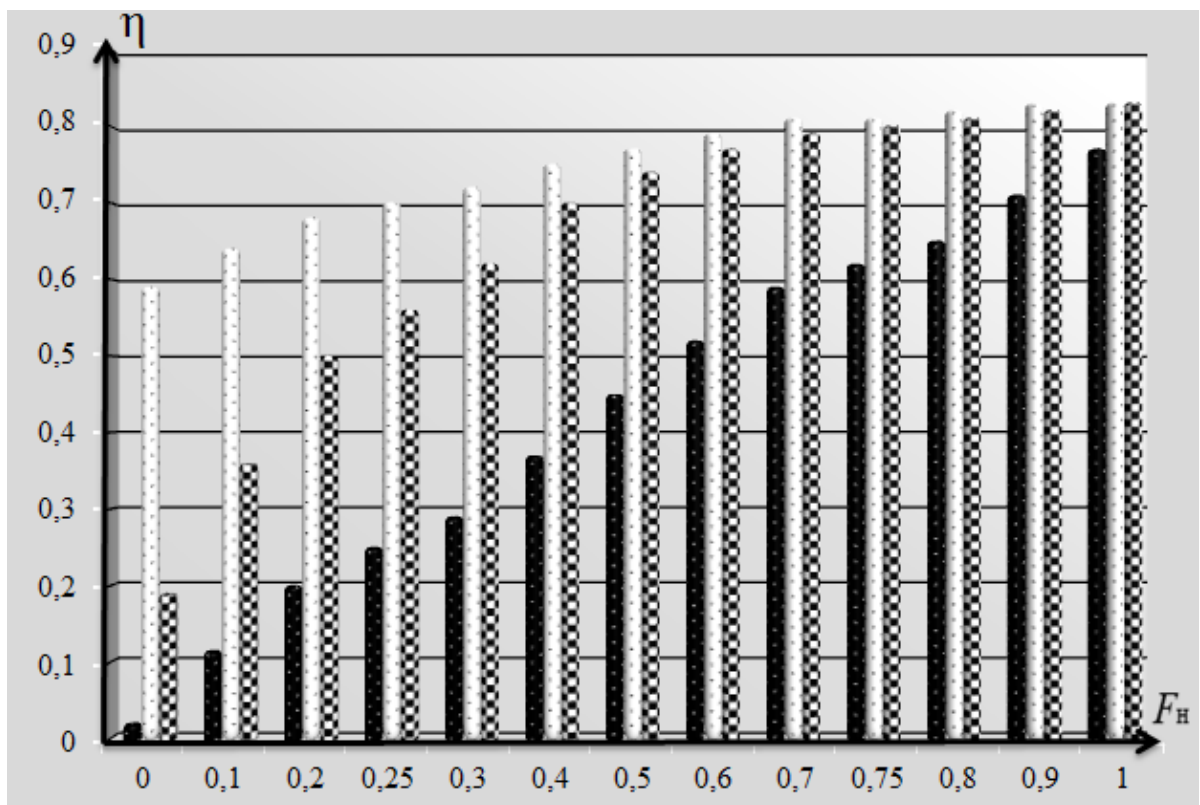





Рис. 4.11. Динаміка коефіцієнта корисної дії при диміруванні НДС в схемах:  – рис. 4.9,б ;  – рис. 4.9,в;  – рис. 4.9,г.

Димерування ЛЛ, як відомо з [103], найкраще проводити в мережах високої частоти на основі використання електронних ПРА з широтно-імпульсним регулюванням.

Серед РЛВТ, як це впливає з рис. 3.11 – рис. 3.17, лише лампи типу ДНаТ придатні не тільки для плавного, але й ступінчатого регулювання світлового потоку і то лише в діапазоні від 100 % до 50 %.

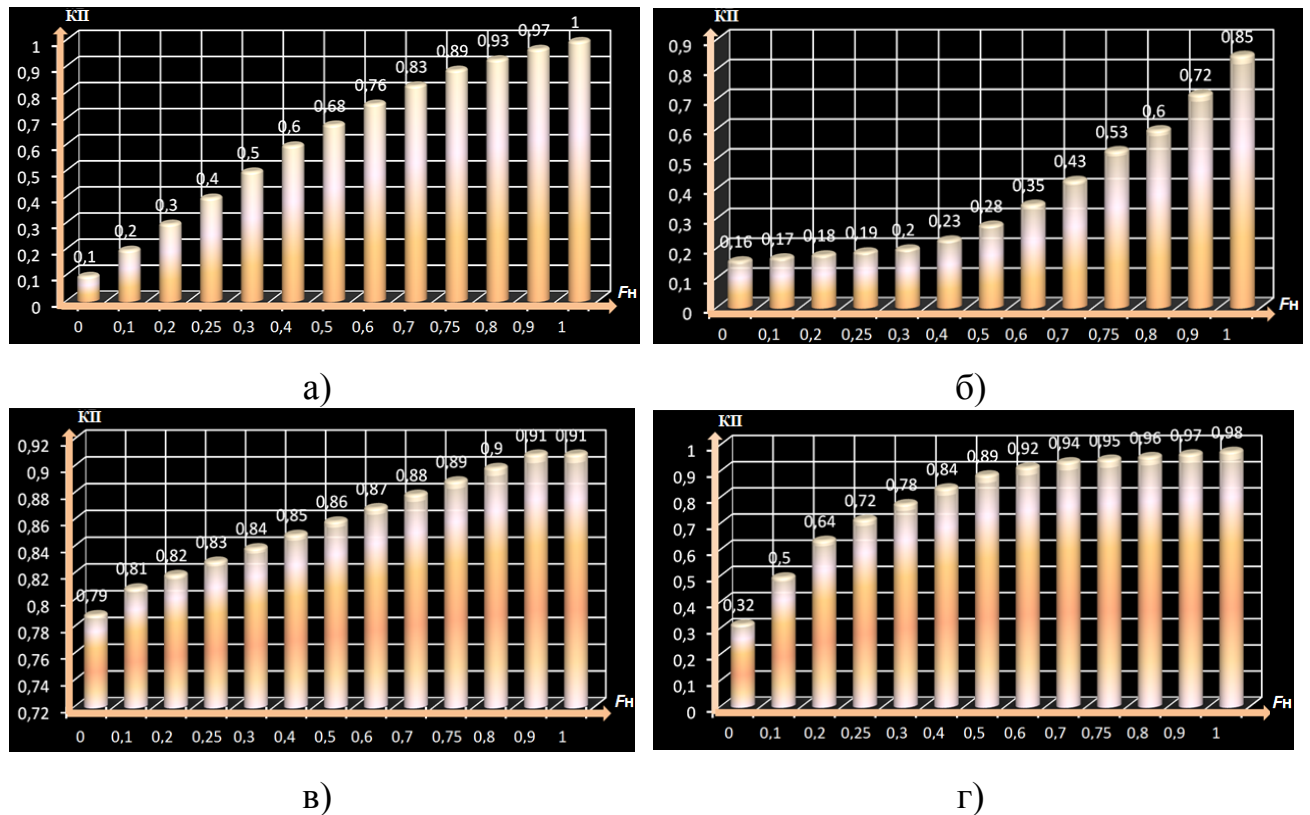
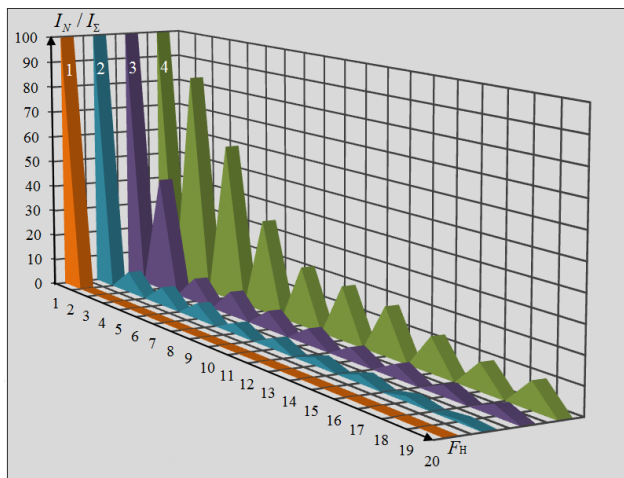


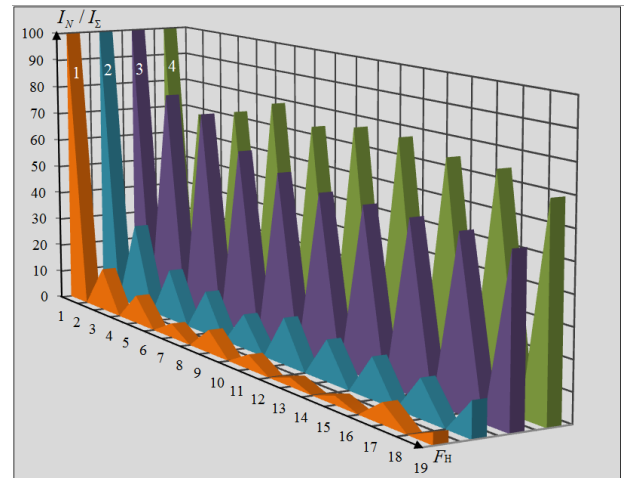
Рис. 4.12. Динаміка коефіцієнта потужності в процесі димерування: а) ТДС в схемі рис. 4.9,а; б) НДС в схемі рис. 4.9,б; в) НДС в схемі рис. 4.9,в; г) НДС в схемі рис. 4.9,г.

регулювання світлового потоку РЛВТ типу ДНаТ, з точки зору енергоефективності та електромагнітної сумісності, найкращим є спосіб, оснований на зниженні напруги живлення за допомогою понижувальних трансформаторів з ступінчастими перемикачами. Найпростіший з них, базується на використанні двох режимних баластних дроселів з додатковими відводами, які підключаються до мережі за допомогою реле. При вмиканні однієї обмотки дроселів має номінальний опір і забезпечує номінальну потужність лампи. При послідовному ввімкненні обох обмоток опір дроселя зростає, що і призводить до зменшення потужності ламп вдвічі. На практиці таке одноступінчатє регулювання, як показали наші дослідження, не виправдовує себе. З плином часу експлуатації лампи ДНаТ починають гаснути, що рівнозначно зниженню їхньої СТС. Це пояснюється тим, що через кожну тисячу годин напруга на лампі зростає приблизно на

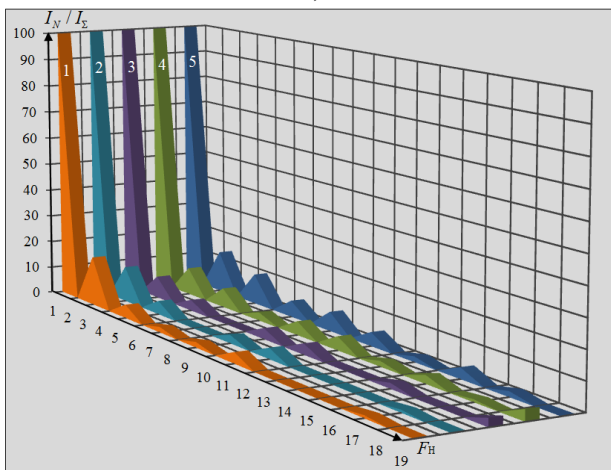
5 В. Тому через певний проміжок часу різке зменшення струму призводить до погасання розряду. Якщо кількість ступінчатих переходів збільшити і розділити їх в часі, то при 50 % димеруванні погасання ламп можна уникнути.



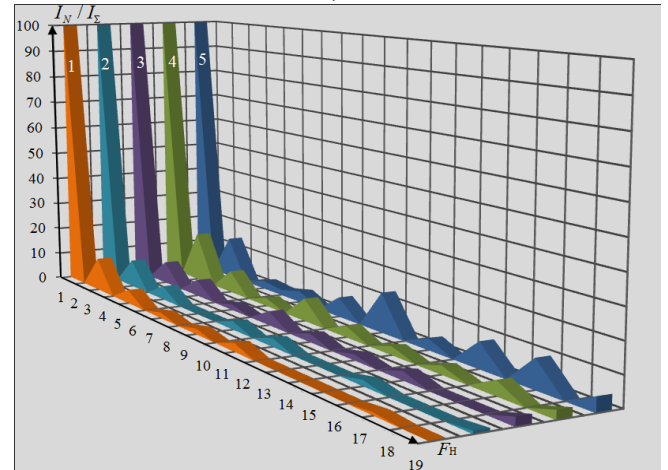
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.13. Динаміка емісії вищих гармонік в процесі димерування: а) ТДС в схемі рис. 4.9,а; б) НДС в схемі рис. 4.9,б; в) НДС в схемі рис. 4.9,в; г) НДС в схемі рис. 4.9,г для різних значень глибини димерування: 1 – $\gamma_1(t) = 1$; 2 – $\gamma_2(t) = 0,75$; 3 – $\gamma_3(t) = 0,5$; 4 – $\gamma_4(t) = 0,25$

Використання систем плавного регулювання, які компенсують спад світлового потоку в процесі старіння шляхом підвищення потужності ДС, одно- значно призводить до помітного зменшення їхньої енергоефективності. Це обумовлено не тільки зростанням потужності ДС і втрат потужності в ПРА (драйвері), але й зменшенням СТС, що може повністю знівелювати очікуваний економічний ефект. Одним з найбільш негативних результатів димерування розрядних ламп низького і високого тиску є висока вірогідність зниження світлового

поток за рахунок більш інтенсивного випаровування оксиду з катодів ЛЛ і розпилення електродів у РЛВТ. Це призводить не тільки до потемніння колби ЛЛ (або пальника у РЛВТ) в місцях розташування електродів [36], але й до падіння СТС.

Так у ЛЛ швидкість випаровування оксиду суттєво зростає при температурах катодів нижче 700°C , що може виникати під час димерування, і вище $1\,000^{\circ}\text{C}$, що виникає при збільшенні потужності, коли прагнуть підвищити світловий потік лампи, яка пропрацювала вже певний час [98]. Підвищення потужності РЛВТ на 12,5 % (18,75 %) скорочує СТС на 8 % (48 %) [158]. Зростання температури p - n переходу НДС на 10°C призводить до скорочення СТС вдвічі [171].

4.4. Концепція конструктивного виконання безблискісних світлодіодних світильників

Найбільш вагомим недоліком потужних світлодіодів є надяскравість. На загальному фоні рівномірного освітлення світлодіоди виглядають як контрастні світлові плями, прямий погляд на які призводить до тимчасового порушення зорових функцій спостерігача. Вони зберігаються деякий час і після закінчення світлової дії у повній відповідності із законом темної адаптації.

Проблема засліплювальної дії при використанні надяскравих світлодіодів може бути вирішена на основі: а) *застосування* матових або прозорих призматичних розсіювачів; б) *використання* вторинної лінзової оптики з розсіювальними властивостями; в) *перенаправлення* світлових променів за допомогою відбиваючих систем таким чином, щоб надяскраві плями не були доступні погляду; г) *відмови* від застосування світлодіодів великої потужності з надмірними густинами струму через кристал ($j \geq 5 \text{ А/мм}^2$). Великі світлові віддачі $H=100\text{-}120 \text{ лм/Вт}$ простіше отримати від малопотужних ($0,25 \text{ Вт} \leq P \leq 0,5 \text{ Вт}$) і середньої потужності ($0,50 \text{ Вт} \leq P \leq 1 \text{ Вт}$) світлодіодів при умові певної навантаженості за густиною струму. Для цього необхідно знайти компроміс між

співвідношенням розмірів випромінюючого кристала, густиною струму, тепло-виділенням і вартістю [196].

У найбільш розповсюджених у теперішній час ретрофітних світлодіодних ДС (аналогів ЛР) надмірну яскравість усувають за допомогою дифузних розсіювачів. При цьому для них встановлений досить жорсткий форм-фактор. Вони повинні мати форму, розміри і цоколь такі ж, як і у класичних ЛР. З технічної точки зору це абсолютно нелогічно. Немає потреби обмежувати розробників світлотехнічної світлодіодної продукції вимогами, які є оптимальними лише для ТДС. Потрібно дати можливість конструкторам створювати не тільки енергоощадну, але й ергономічну світлотехнічну продукцію. Відхід від категорії «лампа» до категорії «освітлювальний прилад» дасть можливість не лише підвищити реальний строк служби власне світлодіодів (до 25-50 тис. год) за рахунок реалізації ефективного тепловідводу, але й ліквідувати надмірну яскравість. При цьому слід пам'ятати, що застосування матових розсіювачів для світлодіодів є контрпродуктивним тому, що призводить до суттєвого зниження світлової віддачі.

Як правило, освітлювальні прилади (ОП) проектують в залежності від параметрів об'єкта освітлення, враховуючи класи з світлорозподілу (відношення світлового потоку, який випромінюється ОП у верхню напівсферу, до загального світлового потоку світильника). Дуже важливим світлотехнічним параметром ДС і ОП, який визначає енергоефективність освітлення, є крива сила світла (КСС).

Для малопотужних світлодіодів характерні концентрована, глибока і косинусна КСС, а для потужних – косинусна. Для розширення номенклатури ОП за типами КСС застосовують заломлюючі і відбиваючі елементи вторинної оптики. Вторинні заломлюючі оптичні елементи – це одиночні або блочні лінзи, які перерозподіляють світловий потік від світлодіода, формуючи потрібну КСС. Реальна ефективність гладких заломлюючих елементів з концентрованою і глибокою КСС становить близько 90 %. Для отримання косинусної, напівширокої і широкої КСС на вихідному торці лінз формують растрову систему мікро-

лінз або грубий мікрорельєф, щоб поверхня набула розсіюючих властивостей. Це призводить до зниження ефективності таких елементів до 70-85 % [197].

Ефективно перенаправити світловий потік і одночасно усунути надяскравість точкових ДС можна і за допомогою дзеркальних відбиваючих систем. Їхня ефективність залежить від якості дзеркального покриття і становить, як правило, 90 %. За їх допомогою можна формувати не тільки будь-які КСС, але й суттєво знизити надяскравість точкових ДС. В теперішній час вони поки що не отримали широкого розповсюдження. Це пояснюється їх більш значними габаритами і побоюваннями щодо можливої поступової деградації дзеркальних поверхонь світловідбиваючих систем. Хоча вірогідність деградації вторинної оптики, виготовленої з поліметилметакрилата або з полікарбонату, за рахунок зменшення коефіцієнта пропускання в результаті забруднення або зміни структури під дією високої температури від світлодіодів, також є високою. Слід також пам'ятати, що вартість елементів вторинної оптики співрозмірна з вартістю власне світлодіодів [198].

Перспективним можна вважати й створення двох- або трьохкомпонентних ОП, які б забезпечували комфортне освітлення не тільки робочих поверхонь, але й стелі, стін та центральної частини приміщень. Прикладом одного з таких рішень може служити конструкція світильника для житлових приміщень на основі використання джерел світла з точковим світним тілом (світлодіодів) (рис. 4.14) [199].

Запропонований світильник складається з чотирьох основних складових:

а) *циліндричної тарілки-радіатора 3*, що виконана у вигляді колеса зі спицями 4 і оснащена виступами 5, розташованими під кутом 120° один до одного по верхній площині, для утворення щілинних отворів між стелею і тарілкою-радіатором 3 з метою забезпечення ефективного конвекційного охолодження світлодіодів 6, які розміщені по колу напроти спиць 4 вздовж її зовнішньої бокової поверхні;

б) *основного дзеркального відбивача 7* з поверхнею обертання з еліпсоїдною утворюючою, розташованою за межами осі обертання;

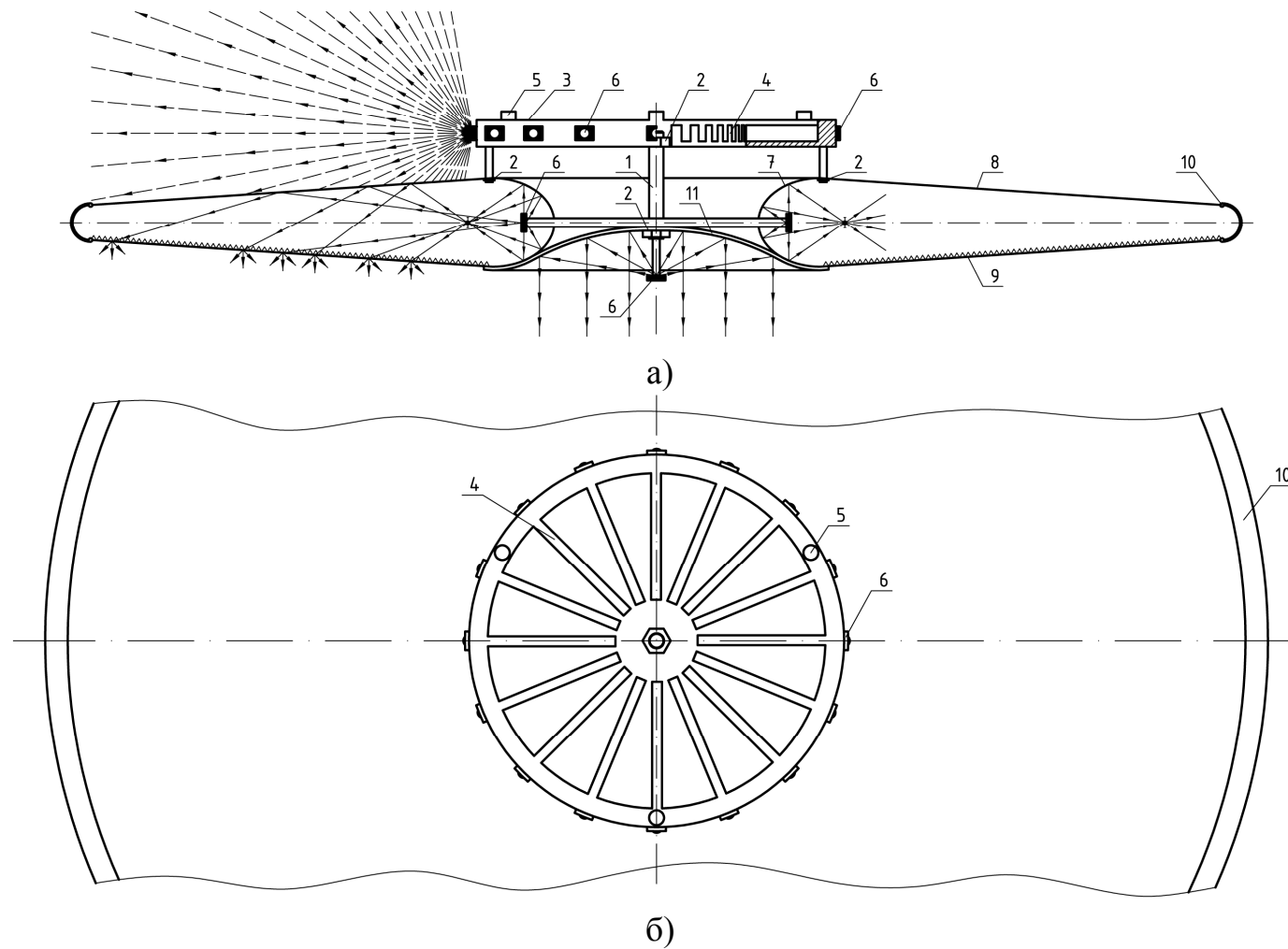


Рис. 4.14. Чотирьох компонентний світлодіодний світильник: а) вигляд збоку; б) вигляд зверху. 1 – підвісна штанга; 2 – елементи кріплення; 3 – тарілка-радіатор; 4 – спиці; 5 – виступи; 6 – світлодіоди; 7 – основний дзеркальний відбивач; 8 – додатковий дзеркальний відбивач; 9 – розсіювач; 10 – хомут; 11 – параболо-круговий дзеркальний відбивач

в) *додаткового дзеркального відбивача 8 і розсіювача 9, кожен з яких виконаний у вигляді диску. Для більш ефективного використання променів, спрямованих на додатковий дзеркальний відбивач, вони нахилені під кутом 10° один відносно одного і скріплені за допомогою хомути 10;*

г) *параболо-кругового дзеркального відбивача 11, виконаного з можливістю дотику до корпусу основного дзеркального відбивача 7.*

Тарілка-радіатор 3 нерухомо закріплена по периметру до основного 7 та додаткового 8 дзеркальних відбивачів і по оптичній осі до параболо-кругового дзеркального відбивача 11. Всі перелічені складові з'єднані між собою підвісною штангою 1, на якій за допомогою елементів кріплення 2 нерухомо закріплена верхня циліндрична тарілка-радіатор 3.

Світлодіоди 6 розташовані також і вздовж першої фокальної лінії основного дзеркального відбивача 7 та в фокусі параболо-кругового дзеркального відбивача 11. Друга фокальна лінія основного дзеркального відбивача 7 розташована між дисковим додатковим дзеркальним відбивачем 8 і розсіювачем 9.

Світильник працює наступним чином. Світлові промені від світлодіодів 6, що розташовані вздовж першої фокальної лінії основного дзеркального відбивача 7, відбиваючись від його поверхні, перетинаються в його другій фокальній лінії і попадають в кільцевий канал, утворений додатковим дзеркальним відбивачем 8 і дисковим розсіювачем 9. Сформований таким чином світловий потік забезпечує освітлення підлоги і більшої частини стін. Світлові промені від світлодіодів 6, розміщених по колу вздовж зовнішньої бокової поверхні тарілки-радіатора 3, забезпечують освітлення стелі і верхньої частини стін. Світлові промені від світлодіода 6, розташованого в фокусі дзеркального параболо-кругового відбивача 11, освітлюють підлогу, яка знаходиться під центральною непрозорою частиною світильника.

Таким чином, запропонований світильник володіє більш високою енергоефективністю за рахунок використання високоефективних точкових напівпровідникових джерел світла і забезпечує більш високу (безблискісну) якість освітлення всіх зон приміщення, а саме: стелі, стін та підлоги.

4.5. Особливості освітлення автомобільних доріг і пішохідних переходів

Якість штучного освітлення автомобільних доріг і пішохідних переходів прийнято розглядати з точки зору безпеки руху. При цьому за основу приймають наступні питомі показники дорожньо-транспортних пригод (ДТП): кількість ДТП, віднесені до тривалості різних періодів доби (дня, ночі, вечірніх і ранішніх сутінків).

За даними національної адміністрації з безпеки дорожнього руху США [200], 30 % нещасних випадків на дорогах з участю пішоходів відбувається в проміжку від 20⁰⁰ до 24⁰⁰ години. При цьому число смертельних випадків з участю пішоходів складає близько 12 % від загальної їх кількості. А в густонаселених районах з великою кількістю автотранспорту і високою інтенсивністю руху смертність пішоходів доходить до 27 %. Вдень різного роду аварій втричі менше, ніж вночі.

Все це вказує на необхідність підвищення якості освітлення не тільки автомобільних доріг, але й перехресть та пішохідних переходів. При цьому потрібно врахувати всі особливості зору людини не тільки вночі, але й в умовах присмеркового штучного освітлення. Треба також пам'ятати, що саме водії є основними користувачами штучного зовнішнього освітлення. Вони, у порівнянні з пішоходами, мають значно менше часу на прийняття відповідних рішень, і тому є більшим джерелом небезпеки, ніж пішоходи.

Відомо, що вдень в очі працюють виключно колбочки, які найбільш чутливі до довжини хвилі $\lambda \approx 555$ нм (жовто-зелена ділянка спектра – фотопічний зір). Вони зосереджені в центрі сітківки і забезпечують чіткий центральний зір, розрізнення кольорів і мілких деталей. Вночі працюють виключно палички, які найбільш чутливі до довжини хвилі $\lambda \approx 515$ нм (зелено-голуба ділянка спектра – скотопічний зір), розташовані за межами центру сітківки й забезпечують периферійний зір, дозволяючи оку виявляти рух.

Відрізок часу перед сходом і після заходу Сонця, під час якого природне освітлення забезпечується верхніми шарами атмосфери, які приймають прямі сонячні промені й частково відбивають їх на поверхню Землі, називають сутінками. Їх поділяють на громадянські, навігаційні й астрономічні. Для світлотехніків найбільш цікавими є навігаційні сутінки, коли центр Сонця знаходиться нижче горизонту від $6,01^\circ$ до 12° . Під час навігаційних сутінків природного освітлення недостатньо для нормальної життєдіяльності людини (освітлення на вулиці ближче до нічного, ніж до вечірнього в класичному розумінні), тому вулиці населених пунктів потрібно освітлювати.

Тривалість сутінків залежить від широти місцевості і пори року. На полюсах тривалість сутінків (того чи іншого виду) триває 2-3 тижні, в той час як на екваторі – 20-25 хв. У помірних широтах тривалість сутінків найменша під час рівнодення, трохи більша під час зимового сонцестояння й найбільша в кінці весни і на початку – середині літа. Тривалість сутінків t та величина схилення Сонця δ для найкоротших їх значень розраховуються за формулами

$$\sin(t / 2) = \sin 9^\circ \cdot \sec \varphi, \quad (4.15)$$

$$\sin \delta = -\operatorname{tg} 9^\circ \cdot \sin \varphi, \quad (4.16)$$

де φ , t – широта місцевості і тривалість сутінків відповідно.

Якщо схилення Сонця $\delta > (90^\circ - \varphi) - |h|$ (де h – кут занурення Сонця під горизонт), то сутінки можуть тривати всю ніч не припиняючись, наприклад за полярним колом. Для навігаційних сутінків таке можливо від широти $\varphi = 54^\circ 33' 43$.

У сутінках при проміжних між денним і нічним рівнями освітленості вступає в дію присмерковий (мезопічний) зір, при якому працюють як палички, так і колбочки. Палички, у зв'язку з тим, що вони мають більшу світлочутливість, відіграють основну роль у присмерковому освітленні. При цьому здатність до розрізнення кольорів у них помітно нижча. В присмерковому діапазоні спектральна чутливість не є постійною. Вона змінюється в залежності від рівня освітленості, що зв'язано зі зміною відносного вкладу паличок і колбочок в процесі сприйняття світла [201].

В теперішній час основними критеріями світлотехнічної ефективності зовнішнього освітлення є видимість і пороговий контраст (мінімальний контраст, який може сприйняти око). Видимість характеризується або ступенем розпізнавання (наскільки чітко видно об'єкт), або дальністю видимості (відстанню, на якій об'єкт спостереження стає невидимим). Візуальне сприйняття об'єкта стає можливим лише при певному контрасті між об'єктом і фоном. Величина контрасту визначається відношенням різниці яскравостей об'єкта спостереження L_o і фона L_ϕ до яскравості фона $C = (L_o - L_\phi) / L_\phi$. В ідеалі контраст між освітлювальним об'єктом і його найближчим оточенням не повинен перевищувати трьох, а контраст між об'єктом і загальним фоном – десяти. Як надмірно різкий, так недостатній контраст призводять до швидкої зорової втоми [202, 203].

Візуальна ефективність залежить від конкретних умов застосування джерела світла в конкретній задачі. Для зовнішнього освітлення візуальну ефективність останнім часом пропонується визначати за значенням S/P (scotopic / photopic – денний / нічний)-фактора і рівня денної яскравості (в Європі такі рекомендації вступили в дію з вересня 2010 р.). S/P-фактор характеризує відношення світлової віддачі ДС в умовах нічного зору до світлової віддачі в умовах денного зору [204, 205]. Для оцінки величини візуальної ефективності необхідно визначити рівень присмеркової яскравості. Присмеркова яскравість еквівалентна загальноприйнятій денній яскравості з врахуванням впливу спектрального складу випромінювання ДС на візуальне сприйняття в умовах присмеркового освітлення. Визначити величину присмеркової яскравості, спираючись на значення S/P-фактора і рівень денної яскравості, можна за даними таблиці, наведеної в [206, 207]. Конкретні значення S/P-фактора для найбільш вживаних для зовнішнього освітлення ДС наведено в табл. 4.5.

Слід зазначити, що наведені в табл. 4.5 значення S/P-фактора не є остаточними для вказаних типів ДС. Скоріше це орієнтовні значення. Це пояснюється тим, що вони залежать від виробника, потужності та терміну експлуатації. Але чим вище значення S/P-фактора, тим краще ДС пристосовано для роботи в

умовах присмеркового зору. Це пояснюється тим, що у них більша короткохвильова складова у загальному світловому потоці.

Таблиця 4.5
S/P-фактор для різного типу ДС

Джерело світла	S/P
Розрядна лампа низького тиску типу ДНаТ	0,25
Розрядна лампа високого тиску типу ДНаТ	0,65
РЛВТ типу ДРЛ	1,05
НДС тепло-білого світла	1,15
РЛВТ типу ДРІ тепло-білого світла	1,45
РЛВТ типу ДРІ з керамічним пальником, $T_k = 4000$ К	1,60
НДС холодно-білого світла	2,15
РЛВТ типу ДРІ денного світла	2,45
Безелектродна розрядна лампа з $T_k = 6500$ К	2,88

Треба пам'ятати і про те, що дорожнє покриття відбиває світло в довгохвильовій частині спектру краще, ніж в короткохвильовій. Тому при застосуванні ДС з високими колірними температурами (з великою часткою короткохвильового випромінювання) засліплення від світлодіодних світильників буде більшим, ніж від ОП з РЛВТ типу ДНаТ.

Фонове освітлення автомобільних доріг повинно бути таким, щоб потенційні перешкоди сприймалися водієм як темні силуети – ефект негативного контрасту (темний силует на світлому фоні), який забезпечує високоякісну контурну видимість об'єктів, які рухаються, навіть на великих відстанях. Це дуже важливо для водіїв автотранспортних засобів. В той час як позитивний контраст, при якому об'єкт освітлюється так, щоб він виглядав яскравіше фону (за допомогою ввімкнених фар автотранспортного засобу), допомагає учасникам руху розгледіти деталі об'єкта. Це важливо для ідентифікації об'єкта водієм і, відповідно, для безпеки руху. Тому на пішохідних переходах необхідно забезпечувати великий позитивний контраст рівнів освітленості, а на значних відстанях від них – негативний контраст за допомогою ОП типового зовнішнього освітлення.

Природно, що при певних умовах позитивний контраст від ввімкнених фар автотранспортного засобу може бути скомпенсований на пішохідному переході негативним контрастом від зовнішнього освітлення, і об'єкт може стати невидимим або погано видимим. Для того, щоб такого не сталося, необхідно на

пішохідних переходах використовувати таке додаткове освітлення, яке б завжди забезпечувало позитивний контраст при будь-яких атмосферних умовах. Тобто необхідно «ввімкнути» механізм кольорового зору. Це можна реалізувати виключно за допомогою білого світла, наприклад, за допомогою світлодіодних ОП, тому що жовте світло від РЛВТ типу ДНаТ здатне створювати лише негативний контраст.

З появою НДС все частіше стали звучати висловлювання про необхідність підвищення ефективності зовнішнього освітлення шляхом заміни РЛВТ типу ДНаТ на джерела білого світла. В основу такої мотивації покладено те, що при використанні ламп білого світла наявність кольорового контрасту дозволяє значно скоротити реакцію людини. До найкращих джерел білого світла віднесені НДС, РЛВТ типу ДРІ і безелектродні ЛЛ. При цьому попередні дослідження про те, що застосування жовтого світла РЛВТ типу ДНаТ призводить до різкого підвищення негативного контрасту, внаслідок якого різко знижується тривалість реакції та швидкість розпізнавання рухомих і нерухомих перешкод і об'єктів, ігноруються.

Для того щоб визначити, яке з існуючих ДС є для зовнішнього освітлення не тільки енергоефективним, але й забезпечує найвищу ступінь безпеки руху на автошляхах і пішохідних переходах, а також безпечним для здоров'я людини, розглянемо плюси і мінуси кожного з них.

Згідно з результатами досліджень, проведених міжнародною групою вчених, з'ясувалося, що найбільш шкідливим для здоров'я людини є біле світло насичене синьою складовою з довжиною хвилі 440-500 нм, що характерно для НДС. Таке світло пригнічує синтез мелатоніна в організмі людини в 5 разів сильніше, ніж золотисто-жовте світло РЛВТ типу ДНаТ. Мелатонін є основною компонентою пейсмейкерної системи організму. Він потрібен для нормальної роботи біологічного годинника, а також має антиоксидантні та протипухлинні властивості. Недостача мелатоніна викликає такі патології як джетлаг, безсоння, синдром затримки сну не тільки у людей, але й у тварин. Крім того,

мелатонін приймає участь в регуляції кров'яного тиску, функцій травного тракту та роботі головного мозку.

Важливим є і те, як світло розсіюється у мутному середовищі (тумані, різної інтенсивності дощі тощо). Відомо, що інтенсивність розсіювання залежить від розмірів неоднорідностей і довжини хвилі випромінювання. Релей встановив [208], що при розсіюванні у мутному середовищі на неоднорідностях менших ніж $0,2 \cdot \lambda$ інтенсивність розсіювання обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі. Інтенсивність розсіювання на більш крупних неоднорідностях обернено пропорційна третій степені, а на ще більш крупніших – другій степені довжини хвилі. Враховуючи те, що діаметр крапель туману знаходиться в межах від 1 до 120 мкм, ми будемо стикатися з різними інтенсивностями розсіюванні світла в тумані. В тому числі і з явищем Тіндаля, коли промінь світла від фар стає видимим при спостереженні з будь-якої сторони. Але короткі хвилі будуть розсіюватися однозначно сильніше у порівнянні з жовтими. Тому в тумані видимість у світлі жовтих фар транспортних засобів завжди буде кращою, ніж у білому світлі. Причому, чим більша синя складова у випромінюванні ДС, тим менше буде видимість.

З вище викладеного можна зробити наступний висновок. РЛВТ типу ДНаТ є кращим від будь-якого ДС білого світла (особливо світлодіодного) з усіх точок зору, а саме:

1 – золотисто-жовте світло: а) *не подавляє* мелатонін; б) *не так сильно розсіюється* в тумані; в) *не призводить* до засліпленості при прямому розгляданні ДС, чого не скажеш про над яскраві світлодіоди;

2 – *температура* оточуючого середовища не впливає на світлову віддачу РЛВТ типу ДНаТ;

3 – *в процесі розгорання* ламп ДНаТ відбувається поступове зростання світлового потоку, а не падіння, як це характерно для ДС;

4 – *середня тривалість світіння* у РЛВТ типу ДНаТ (28-40 тис. год) більша від СТС НДС (25 тис. год);

5 – *найбільша* величина реальної світлової віддачі (до 177 лм/Вт);

6 – *широка гамма* потужностей (50-1000 Вт).

Пропозиції використовувати для зовнішнього освітлення автомобільних магістралей ДС з високим значенням S/P фактора для того, щоб врахувати особливості присмеркового зору і знизити норми освітленості для нього (за даними [205] при переході від РЛВТ типу ДНаТ до безелектродних ЛЛ в $9500 \text{ лм} / 3620 \text{ лм} = 2,62$ рази), не є переконливими. По-перше тому, що невідомо про які сутінки йдеться мова: громадянські, навігаційні чи астрономічні. Кожне з них характеризується певними не схожими параметрами. По-друге – в діючих державних будівельних нормах України і різного роду СНіПах про ніякі коефіцієнти типу S/P-фактора не згадується. По-третє – існуючі люксметри налаштовані на фотопічну, а не на мезопічну криву зору. По-четверте – немає чіткого пояснення високим значенням S/P-фактора для різних типів ДС. В [207] це пояснюється більшою короткохвильовою складовою у загальному світловому потоці ДС, що в принципі логічно. А в [205] найбільше значення S/P-фактора ($S/P = 4,41$) належить 1 000 Вт ЛР загального призначення, у якої практично відсутнє короткохвильове випромінювання. По-п'яте – хоча у безелектродних розрядних ЛЛ S/P-фактор найбільший ($S/P = 2,88$), але світлова віддача не перевищує 80 лм/Вт. Саме тому виробники висловлюються за припинення їх виробництва.

З вищевикладеного можа зробити висновок про те, що автомобільні дороги найкраще освітлювати золотисто-жовтим світлом РЛВТ типу ДНаТ, а пішохідні переходи додатково ще й спеціалізованим світлодіодними освітлювальними приладами, які б працювали тільки в ті періоди часу, коли в зоні пішохідного переходу одночасно будуть знаходитися транспортні засоби і пішоходи, що дасть можливість не тільки підвищити енергоефективність освітлювальних установок, але й знизити число дорожньо-транспортних пригод з участю пішоходів.

РЛВТ типу ДРІ та ДРЛ застосовувати для зовнішнього освітлення не доцільно. ДРІ дорогі й не піддаються регулюванню. РЛВТ типу ДРЛ навпаки дешеві, зручні у користуванні, але мають низьку світлову віддачу (від 40

лм/Вт для ламп потужністю 50 Вт до 60 лм/Вт для ламп потужністю 1 000 Вт) і не допускають високих глибин (кратностей) регулювання світлового потоку.

4.6. Висновки з розділу 4

1. Доведено, що системний підхід до оцінки енергоефективності джерел світла (незалежно від фізичних принципів їхньої дії) та освітлювальних установок, побудований на врахуванні максимальної кількості доступних параметрів (вартості джерел світла та мінімально необхідної для них пускорегулювальної апаратури, потужності джерел світла та втрат потужності в ПРА, світлової віддачі комплекту ДС+ПРА, середньої тривалості світіння тощо) дає можливість отримати реалістичні дані щодо їхньої енергоефективності, на основі порівняння питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої джерелами світла за середню тривалість їхнього світіння. Використання результатів розрахунків системного підходу дає можливість отримати економічний ефект в розмірі 10-25 % за рахунок реалізації освітлювальних установок з найменшою питомою вартістю одиниці світлової енергії.

2. Виявлено, що кожному типу джерел світла, в залежності від фізичних принципів їхньої дії (теплових, напівпровідникових, розрядних низького та високого тиску, катодолюмінесцентних тощо), притаманні свої, характерні виключно для них ділянки, в межах яких регулювання світлового потоку є дійсно економічно вигідним. Для теплових джерел світла ця ділянка обмежена нормованим значенням напруги мережі $U_n = 0,40$, в той час як для напівпровідникових ДС такого обмеження не існує.

3. Встановлено, що чим більше співвідношення між вартістю джерел світла і витратами на оплату за електроенергію, спожиту ними протягом номінальної СТС, тим менше вплив втрат в ПРА, вартості спожитої комплектом ДС+ПРА електроенергії та спаду світлового потоку ДС в процесі експлуатації на хід залежності енергоефективності регулювання світлового потоку.

4. Доведено, що найкращим з точки зору енергоефективності регулювання світлового потоку ДС є те значення аргументу, в околі якого характерні не тільки найменші значення нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, але й виробляється максимальна її кількість. Для ТДС це $U_n = 0,6$, а для НДС – $I_n = 0,27$.

5. Отримано аналітичну залежність для визначення втрат потужності в електромагнітних баластних дроселях для розрядних ламп низького та високого тиску в залежності від номінальної потужності вибраного джерела світла, що дало можливість оцінювати їх вплив на енергоефективність ОУ як для стаціонарного режиму експлуатації, так і при димеруванні.

6. Запропоновано аналітичний вираз для отримання реалістичних даних економії електричної енергії в залежності від глибини димерування для будь-яких функціональних залежностей регулювання світлового потоку.

7. Встановлено, що для джерел світла з постійно падаючою залежністю енергоефективності регулювання світлового потоку з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої в процесі димерування, найкращім режимом експлуатації є режим ввімкнено-вимкнено на основі застосування датчиків присутності.

8. Експериментально доведено, що серед розглянутих способів регулювання світлового потоку з точки зору енергоефективності та електромагнітної сумісності найкращими є: а) для НДС, КЛЛ і прямих ЛЛ – спеціалізовані драйвери з додатковим виходом для керування постійною напругою 0-10 В або інтегральні імпульсні DC/DC драйвери із зовнішнім сигналом з ШІМ; б) для РЛВТ типу ДНаТ (в діапазоні 100 % – 50 %) і ТДС (в діапазоні 100 % – 0 %) – спосіб, оснований на зниженні напруги живлення за допомогою понижувальних трансформаторів із ступінчастими перемикачами.

9. Запропоновано концепцію конструювання безблискісних світлодіодних світильників, яка ґрунтується на багатокomпонентності: переході від категорії «лампа» до категорії «освітлювальний прилад», від потужних до мало- та

середньопотужних світлодіодів з перенаправленням їхніх світлових променів за допомогою відбиваючих систем та вторинної лінзової оптики таким чином, щоб осередки надяскравості не виникали.

10. Доведено, що автомобільні дороги найкраще освітлювати золотисто-жовтим світлом РЛВТ типу ДНаТ, а пішохідні переходи додатково ще й спеціалізованим світлодіодними освітлювальними приладами, які б працювали тільки в ті періоди часу, коли в зоні пішеходного переходу одночасно будуть знаходитися транспортні засоби і пішоходи, що дасть можливість не тільки підвищити енергоефективність освітлювальних установок, але й знизити число дорожньо-транспортних пригод з участю пішоходів.

ВИСНОВКИ

1. Доведено, що одночасне зменшення діаметру розрядної трубки й струму через лампу призводить до суттєвого зростання градієнту потенціалу в позитивному стовпі розряду (відносних значень напруг на ЛЛ), обмежуючи можливість виготовлення потужних (довгих) ЛЛ для електричних мереж промислової частоти напругою 220-230 В.

2. Доповнено наукові дані поняттям просторових пульсацій світлового потоку, що дозволило: а) сформулювати вимоги щодо раціонального розміщення в приміщеннях двох- і чотирьохлампових світильників, виготовлених за схемою з розщепленою фазою для мережі промислової частоти 50 Гц; б) пояснити причини зростання (зменшення) коефіцієнта пульсацій світлового потоку білого світла від теплових і розрядних джерел світла при проходженні через колби різного кольору або кольорові світлофільтри.

3. Уперше доведено, що динаміка перехідного процесу спаду світлового потоку напівпровідникових джерел світла від моменту ввімкнення до переходу в усталений режим, а також протягом експлуатації в межах середньої тривалості світіння з достатньої для практики похибкою (5-8 %) описується різницею падаючої і зростаючої експоненціальних функцій з різними за величиною сталими часу та сталими інтегрування, що дало можливість: а) оцінювати вклад кожного з теплових опорів (світлодіод-радіатор, радіатор-оточуюче середовище) в процес тепловідводу надлишкового тепла від драйвера і світлодіодів; б) запропонувати методику визначення оптимальної величини номінального струму, дотримання якого забезпечує економічний ефект в розмірі не менше 10 % від вартості світлового приладу за рахунок забезпечення гарантійної середньої тривалості світіння розроблюваних на основі світлодіодів світлотехнічних виробів; в) визначати кількість світлової енергії, генерованої за будь-який наперед заданий проміжок часу.

4. На основі аналізу та узагальнення отриманих нами експериментальних даних запропонована система рівнянь (3.15) – (3.19) для визначення електрич-

них та світлотехнічних параметрів НДС, що дало можливість визначати їхню енергоефективності в процесі регулювання світлового потоку.

5. Запропоновано аналітичний вираз для розрахунку реалістичних даних економії електричної енергії для будь-якої функціональної залежності регулювання світлового потоку джерел світла з врахуванням втрат потужності в пускорегулювальній апаратурі, що дає можливість отримати економічний ефект в розмірі 10-50 % від розрахункової споживаної електричної енергії за рахунок вибору найкращого (для розглядуваної освітлювальної установки) способу диметування світлового потоку.

6. Доведено, що системний підхід до оцінки енергоефективності джерел світла (незалежно від фізичних принципів їхньої дії) та освітлювальних установок, побудований на врахуванні максимальної кількості доступних параметрів (вартості джерел світла та мінімально необхідної для них пускорегулювальної апаратури, потужності джерел світла та втрат потужності в ПРА, світлової віддачі комплекту ДС+ПРА, середньої тривалості світіння тощо) дає можливість отримати реалістичні дані щодо їхньої енергоефективності, на основі порівняння питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої джерелами світла за середню тривалість їхнього світіння. Використання результатів розрахунків системного підходу дає можливість отримати економічний ефект в розмірі 10-25 %, за рахунок реалізації освітлювальних установок з найменшою питомою вартістю одиниці світлової енергії.

7. Запропоновано концепцію конструювання безблискісних світлодіодних світильників, яка ґрунтується на багатокомпонентності, а саме: переході від загального до зонального освітлення приміщень, від категорії «лампа» до категорії «освітлювальний прилад», від потужних до мало- та середньопотужних світлодіодів з перенаправленням їхніх світлових променів за допомогою відбиваючих систем та вторинної лінзової оптики таким чином, щоб осередки надяскравості не виникали, що дає можливість підвищити комфортність освітлення і сприятиме поступовій відмові від виробництва світлодіодних ламп за форм-фактором ламп розжарення загального призначення.

8. Доведено, що автомобільні дороги найкраще освітлювати золотисто-жовтим світлом РЛВТ типу ДНаТ, а пішохідні переходи додатково ще й спеціалізованими світлодіодними освітлювальними приладами, які б працювали тільки в ті періоди часу, коли в зоні пішохідного переходу одночасно будуть знаходитися транспортні засоби і пішоходи, що дасть можливість не тільки підвищити енергоефективність освітлювальних установок, але й знизити число дорожньо-транспортних пригод з участю пішоходів.

9. Встановлено, що для джерел світла з постійно падаючою залежністю енергоефективності регулювання світлового потоку з точки зору нормованої питомої вартості одиниці світлової енергії, виробленої в процесі димерування, найкращім режимом експлуатації є режим ввімкнено-вимкнено, що забезпечує отримання максимально можливої економії електричної енергії в процесі експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ануфриев В.П. Эколого-экономическая оценка рационального использования энергетических ресурсов в системе Киотского Протокола: Автореф. дис. доктора эконом. наук: Спец. 08.00.05 / В.П. Ануфриев; СГГА. – Новосибирск, 2006. – 42 с.
2. Кризис 2010-х годов и Новая энергетическая цивилизация. / Под ред. В.В. Бушуева, М.Н. Муханова. – М.: Энергия, 2013. – 272 с.
3. Energy for 2050: Scenarios for a Sustainable Future. Paris, IEA, 2003.
4. Energy Technology Perspectives. IEA 2006, 2008, 2010.
5. Іншеков Є.М. Екологічний аспект національної енергетичної стратегії в контексті сталого розвитку держави. // Є.М. Іншеков, О.М. Козуб, О.С. Дробаха // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2010. – С. 98-103.
6. Тщетные усилия света: Стратегии энергоэффективного освещения. / ОЭСР/МЭА,. – 2008. – С. 17-38.
7. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение и техническая политика в области освещения. / Ю.Б. Айзенберг // Светотехника. – 2005 – № 6. – С. 4-9.
8. Айзенберг Ю.Б. Современная политика энергоэффективного освещения. / Ю.Б. Айзенберг // Московский дом света. – 2012 – № 6. – С. 42-47.
9. Кожушко Г. М. Енергозбереження в світлотехніці. / Г. М. Кожушко // Світлолюкс. – 2008. – № 8. – С. 13-16
10. Туликов А.В. Анализ методической и нормативной правовой базы, стимулирующей реализацию энергосберегающих проектов на основе энергосервисных контрактов и подготовка предложений по изменению либо исключению норм законодательства препятствующих широко-масштабной реализации энергосберегающих проектов на данной основе / А.В. Туликов // Отчет о научно-исследовательской работе. – 2013. – М.: Знак – 368 с.
11. Кожушко Г.М. Екологічні проблеми утилізації та використання відходів розрядних ламп. / Г.М. Кожушко // Світлолюкс. – 2007. – № 6. – С. 50-52.

12. Кожушко Г.М. Энергоекономічні джерела світла ХХІ століття. / Г.М. Кожушко // Світлолюкс. – 2005. – № 6. – С. 2-4.
13. Мордюк В.С. Материаловедение и прогресс в светотехнической науке и технике. / В.С. Мордюк // Светотехника. – 2006. – № 6. – С. 2-4.
14. Варрен Джулиан. В Австралии лампы накаливания будут вне закона. / Джулиан Варрен // Светотехника. – 2007. – № 3. – С. 72.
15. Ашурков С.Г. Прощаться с лампами накаливания следует дольше. / С.Г. Ашурков // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 69.
16. www.mdm-light.ru/articles.asp?AID...all
17. Кириленко А.И. Современные принципы управления освещением. / А.И. Кириленко, А.А. Стовпак // Энергия и Менеджмент. – 2004. – № 3. – С. 34-39.
18. Подопригора В.М. Свет в интерьере – технические аспекты. / В.М. Подопригора // Світлолюкс. – 2008. – № 3 – С. 28-31.
19. Медведев М.Г. Некоторые соображения о замене ламп накаливания на компактные люминесцентные лампы. / М.Г. Медведев // Светотехника. – 2010. – № 2. – С. 72.
20. Бодрат М. Характеристики компактных люминесцентных ламп со встроенными пускорегулирующими аппаратами и их сравнение с лампами накаливания. / М. Бодрат, А. Денейер, Б. Ройзин // Светотехника. – 2010. – № 2. – С. 13-20.
21. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 1. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.
22. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 2. / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 18-23.
23. Шуберт Ф. Светодиоды. / Ф. Шуберт, [Пер. с англ. под. ред. А.Є. Юновича] – 2-е изд.–М.: Физматлит, 2008 – 496 с.
24. Cree announces a new laboratory LED efficacy milestone at SIL. URL: <http://ledsmagazine.com/news/10/2/16?Cmpid=EnlLEDsFebruar202013>.
25. Cree's MK-R LED Offers up to 200 Lumen-Per-Watt // LED Professional Review. – 2013 Iss. 35.

26. LEDinside <http://www.russianelectronics.ru>
27. Бегманн Т. Светоизлучающие диоды – тенденции развития и влияние на освещение. / Т. Бегманн // Светотехника. – 2001. – № 5. – С. 10-14.
28. Сабинин В.Е. Светоизлучающие диоды в глобальной экономике. / В.Е. Сабинин // Светотехника. – 2002. – № 3. – С. 9-10.
29. Коган Л.М. Светодиодные осветительные приборы. / Л.М. Коган // Светотехника. – 2002. – № 6. – С. 16-20.
30. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения в будущем. / А.Э. Юнович // Светотехника. – 2003. – № 3. – С. 11-15.
31. Афанасьев В.Б. Светодиодные осветительные и сигнальные приборы с увеличенным световым потоком. / В.Б. Афанасьев, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин // Светотехника. – 2004. – № 6. – С. 52-56.
32. Варезкин М.Г. Спектры излучения мощных светодиодов белого свечения и осветители на их основе. / М.Г. Варезкин, Л.М. Коган // Светотехника. – 2005. – № 1. – С. 15-17.
33. Раттунде Р. Спектр распределения потока излучения сигнальных светодиодных ламп. / Р. Раттунде // Светотехника. – 2005. – № 2. – С. 16-20.
34. Поляковский В. Светодиоды для освещения. / В. Поляковский // Світлолюкс. – 2005. – № 5. – С. 44-46.
35. Гальчина Н.А. Мощные белые светодиоды и модули на их основе для целей освещения. / Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 26-28.
36. Гольдер С. Светильники с белыми светодиодами и высокоэффективным преобразователем постоянного тока. / С. Гольдер., С. Мазмудар, К. Рей // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 38-41.
37. Юнович А.Э. Современное состояние и тенденции развития светодиодов и светодиодного освещения. / А.Э. Юнович // Светотехника. – 2007. – № 6. – С. 13-17.
38. Заремба К. Светильники с высокомошными светодиодами для общего освещения. / К. Заремба, А. Павлак // Светотехника. – 2008. – № 2. – С. 60-63.

39. Лашик С.И. Проблемы применения светодиодов в осветительных и светосигнальных устройствах и пути их решения. / С.И. Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. – 2008. – № 4. – С. 22-25.
40. Лашик С.И. Конструктивно-технологические решения светодиодных ламп прямой замены. / С.И. Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. – 2010. – № 2. – С. 7-12.
41. Сорокин В.М. Светодиодное освещение расширяет границы. / В.М. Сорокин // Світлолюкс. – 2009. – № 2 – С. 37-41.
42. Тараненко Е. Энергоэффективные осветительные приборы на светодиодных источниках света – необходимость и реальность сегодняшнего дня. / Е. Тараненко, В. Трофимец // Світлолюкс. – 2009. – № 2. – С. 48-45.
43. Лашик С.И. О светодиодных лампах прямой замены. / С.И. Лашик, А.А. Паутино, Ю.В. Трофимов // Светотехника. – 2010. – № 1. – С. 48-54.
44. Подопригора В.М. Эти странные LED лампы (заметки практика). / В.М. Подопригора // Світлолюкс. – 2013. – № 3. – С. 29-31.
45. Козлов А. Способы обеспечения питания светодиодов. / А. Козлов // СНІР News Украина. – 2008. – № 3 (73). – С. 4-6.
46. Кириленко А.И. Экологические проблемы светотехники. / А.И. Кириленко // Энергия и менеджмент. – 2003. – № 2. – С. 8-13.
47. Фомин Н. Светодиоды – идеальный источник света? / Н. Фомин, С. Макареня, П. Рудковский // Современная светотехника. – 2010. – № 2. – С. 4-6.
48. Арексис Л. О пульсациях выпускаемых ламп. / Л. Арексис, С. Китсинелис, Ж. Циссис // Светотехника. – 2012. – №3. – С. 58-63.
49. Липовецкий В. Вплив напруги живлення на параметри розрядних ламп високого тиску. / В. Липовецкий, М. Липовецкий, Р. Пилипчук // Світлолюкс – 2009. – № 5. – С. 63-67.
50. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. / Г.Н. Рохлин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
51. Wilkins A.J. Modulation from fluorescent lamps / A.J. Wilkins, C. Clark // Lighting Research and Technology. – 1990 – Vol. 22 , No. 2.– P. 103-109.

52. Wilkins A.J. A tint to reduce eye-strain from fluorescent lighting, Preliminary observations. / A.J. Wilkins, P Wilkinson // *Ophthalmic and Physiological Optics*. – 1991 – No. 11. – P. 172-175.
53. <http://ekosf.ru/poleznoe-alias/articles/525-pulsacii>
54. Ильянок В.А. Влияние пульсирующих источников света на электрическую активность мозга человека. / В.А. Ильянок, В.Г. Самсонова // *Светотехника*. – 1963. – № 5. – С. 16-20.
55. Леонидов А.В. Выбор частоты проблесков светового маяка. /А.В. Леонидов. // *Электротехническая промышленность. Сер. Светотехнические изделия*. – 1982. вып. 6 [78]. – С. 6-7.
56. Масекане К.С. Зрительная работоспособность при питании ламп током повышенной частоты. / К.С. Масекане // *Светотехника*. – 1967. – № 10. – С. 8-12.
57. Масекане К.С. Исследование работоспособности в условиях промышленной осветительной установки на повышенной частоте К.С. Масекане // *Светотехника*. – 1968. – №8. – С. 9-11.
58. Державні будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. ДБН В.2.5-28-2006. Київ. – 2006. – Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. – 75 с.
59. Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. / М.И. Фугенфиров. – М.: Энергия , 1974. – 368 с.
60. Тарасенко М.Г. Дослідження характеристик люмінесцентних ламп у схемах з електронними пускорегулювальними апаратами з ініціувальним генератором. / М.Г. Тарасенко // *Електроінформ*. – 2009. – № 3. – С. 15-18.
61. Тарасенко Н.Г. Расчет двухчастотных схем включения газоразрядных ламп. / Н.Г. Тарасенко, Р.У. Резаков // *Электротехническая промышленность. Сер. Светотехнические изделия*. – 1982. – вып. 2 [74]. – С. 3-6.
62. Мешков В.В. Осветительные установки. / В.В. Мешков, М.М. Епанешников.– М.: Энергия, 1972. – 360 с.

63. Бармин В.В. Некоторые острые вопросы светотехники, требующие решения. / В.В. Бармин // Светотехника. – 2005. – № 4. С. 65-70.
64. Гусева Л.С. Пульсация освещенности в установках с лампами типов ДРИ и ДНаТ. / Л.С. Гусева, Г.К. Смирнов, М.А. Фаермарк // Светотехника. – 1984. – №.10. – С. 1-3.
65. Уткин В.Н. К расчету коэффициента пульсации освещенности. / В.Н. Уткин. // Светотехника. – 1987. – №.7. – С. 11-14.
66. Кузьмин В.Н. Измерения пульсаций источников излучения. / В.Н. Кузьмин, К.А. Томский, А.С. Троицкий // Светотехника – 2004. – № 1. – С. 32-33.
67. Кузьмин В. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов. / В. Кузьмин, В. Антонов, О. Круглов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 26-31.
68. Свод правил СП 52.13330.2011.
69. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
70. Миронов С. Правильное питание светодиодов – залог их здоровой и долгой жизни. Обзор источников питания для различных применений. / С. Миронов // CHIP NEWS Украина. – 2013. – № 4 (124). – С. 12-16.
71. Ошурков И. Обоснованный подход к нормативам пульсаций светодиодного освещения. / И. Ошурков // CHIP NEWS Украина – 2013. – № 6 – С. 38-41.
72. Свиридов Ю.И. Расчет коэффициента пульсаций в осветительных установках с газоразрядными источниками света. / Ю.И. Свиридов // Светотехника. – 1967. – № 6. – С. 10-15.
73. Боос В.Г. Ограничение пульсаций светового потока разрядных ламп местного освещения. / В.Г. Боос, А.П. Меркулова // Светотехника. – 1986. – № 12. – С. 10-11.
74. Клыков М.Е. Пульсации светового потока источников света и методы ее уменьшения. / М.Е. Клыков // Светотехника. – 1985. – № 2. – С. 18-20.

75. Козинский В.А. Электрическое освещение и облучение. / В.А. Козинский. – М.: Агропромиздат, 1991. – 239 с.
76. Соловьев А.К. Автоматическое регулирование искусственного освещения и его эффективность. / А.К. Соловьев // Светотехника. – 1999. – № 5. – С. 2-5.
77. Гребенко Ю.А. Концепция построения автоматизированных систем управления освещением общественных зданий. / Ю.А. Гребенко, Н.П. Елисеев, В.И. Петров, А.Г. Фомин // Светотехника. – 1999. – № 8. – С. 16-19.
78. Соловьев А.К. Эффективность применения автоматически регулируемого совмещенного освещения в производственных зданиях с равномерным верхним естественным освещением. / А.К. Соловьев // Светотехника. – 2000. – № 3. – С. 21-23.
79. Зинякин В.Т. Многозвенный фазовый регулятор светового потока ламп накаливания с повышенным коэффициентом мощности. / В.Т. Зинякин, Ю.С. Игольников // Светотехника. – 2006. – № 4. – С. 34-35.
80. Ермаков Е.А. Управляемые ЭПРА для ламп высокого давления. / Е.А. Ермаков // Современная светотехника. – 2010. – № 2. – С. 50-59.
81. Вейс Б. Регулирование уровня яркости светодиодных светильников без эффекта мерцания. / Б. Вейс // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 3. – С. 14-15.
82. Маркс П. Интересный симбиоз: электронные устройства для светорегулирования. / П. Маркс // Светотехника. – 2003. – № 6. – С. 28-31.
83. Картер Д. Управляемое освещение офисов: стратегия экономии энергопотребления. / Д. Картер, Т. Моор // Светотехника. – 2003. – № 1. – С. 28-33.
84. Бенцигер Т.Д. Светорегулирование в осветительных системах. / Т.Д. Бенцигер // Светотехника. – 2002. – № 1. – С. 27-30.
85. Хайнрих М. Возможности и тенденции экономии электроэнергии при применении электронных пускорегулирующих аппаратов и светорегу-

- лирующей системы LUXCONTROL в осветительных установках. / М. Хайнрих // Светотехника. – 1997. – № 1. – С. 20-24.
86. Holzer W. Neues kompaktes und verlustfreies Lichtregelmodul-auch für Energiesparlampen. / W. Holzer // Licht. – 1988. – № 1-2. – S. 56-59.
87. Зотин О. Анализ эффективности управления энергосбережением в наружном освещении. / О. Зотин, Н. Морозова // Современная светотехника. – 2009. – № 1. – С. 65-68.
88. Хайнц Р. Характер работы разрядных ламп высокого давления при снижении мощности. / Р. Хайнц // Светотехника. – 2005. – № 4. – С. 16-20.
89. Буданова А. Определение уровня освещенности с использованием датчика HSDL-9000. / А. Буданова // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 4. – С. 62-64.
90. Кунгс А.Я. Автоматизация управления электрическим освещением. / А.Я. Кунгс – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 159 с.
91. Сименихин Н.И. Энергоэкономичность автоматического управления освещением учебных заведений. / Н.И. Сименихин // Светотехника. – 1987. – № 2. – С. 23-25.
92. Нарисада К. Баланс между энергией, окружающей средой и зрительной работоспособностью. / К. Нарисада // Светотехника. – 2000. – № 1. – С. 25-29.
93. Калиниченко А.М. Системы управления освещением PHILIPS: от простого к сложному. / А.М. Калиниченко // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 28-30.
94. Миронов С. Димминг светодиодных светильников с помощью источников питания. / С. Миронов, А. Конопельченко // Современная светотехника. – 2010. – № 5. – С. 65-69.
95. Дмитриев С.К. Датчики движения и присутствия – реальная экономия электроэнергии. / С.К. Дмитриев // Энергосбережение. – 2009. – № 7. – С. 41-43.
96. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение в освещении. / Ю.Б. Айзенберг. – М.: Знак, 1999. – 264 с.

97. Лахоцький Т.В. Про деякі засади керування освітлювальними уставами. / Т.В. Лахоцький // Електроінформ. – 2002. – № 3. – С. 14-15.
98. Прамод Бусэл. Срок службы ламп и его прогнозирование при автоматизированном управлении освещением зданий. / Бусэл Прамод // Светотехника. – 2008. – № 1. – С. 53-55.
99. Терехов Г. Димминг – способ эффективного энергосбережения или источник реальных проблем? / Г. Терехов // Современная светотехника (Lightexpert). – 2012. – № 3-4. – С. 72-77.
100. Конопельченко А. Управление освещением и подсветкой помещений с помощью источников питания PCD от Mean Well. / А. Конопельченко // Современная светотехника. – 2009. – № 1. – С. 22-24.
101. Арройо Г. Аналоговое управление яркостью светодиодов. / Г. Арройо // Современная светотехника. – 2012. – № 2. – С. 64-68.
102. Гвоздев-Карелин С.В. Системы и компоненты компании OSRAM для управления освещением и энергосбережения. / С.В. Гвоздев-Карелин, М.С. Свиридов // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 30-34.
103. Обжерин Е.А. Сравнительный анализ способов регулирования светового потока. / Е.А. Обжерин, Д.Н. Панфилов, В.Д. Поляков // Светотехника. – 2000. – № 3. – С. 21-23.
104. Гвоздев-Карелин С.В. Системы управления освещением «OSRAM» для решения задач энергосбережения. // С.В. Гвоздев-Карелин, С.А. Новожилов // Современная светотехника. – 2009. – № 1. – С. 36-41.
105. Айзенберг Ю.Б. Оценка перспективных возможностей энергосбережения в светотехнических установках России. / Ю.Б. Айзенберг, Н.В. Рожкова, Г.В. Федюкина // Светотехника. – 2001 – № 3. – С. 9-13.
106. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение – одна из важнейших проблем современной светотехники. / Ю.Б. Айзенберг // Светотехника. – 2007 – № 6. – С. 6-10.
107. Миллс Э. Потенциальные возможности всемирного энергосбережения в освещении. / Э. Миллс // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 2-4.

108. Сан Мартин Р. Некоторые важные проблемы светотехники. / Р. Сан Мартин // Светотехника. – 2004. – № 3. – С. 46-48.
109. Сорокін В.М. Економічна та екологічна оцінка перспектив використання енергоекономічних ламп у житловому секторі. / В.М. Сорокін, А.В. Рибалочка, Г.М. Кожушко, Ю.А. Басова // Світлолюкс. – 2013. – № 3. – С. 16-21.
110. Пляскин П.В. Основы конструирования электрических источников света. / П.В. Пляскин, В.В. Федоров, Ю.А. Буханов. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
111. Пчелин В.М. К вопросу об оценке энергоэффективности. / В.М. Пчелин // Светотехника. – 2013. – № 5-6. – С. 70-71.
112. Директива 98/11/EG комісії від 27.01.1998 р. з реалізації директиви країн ЕС 92/75/EWG про нанесення маркування енергоефективності на упакування ламп побутового призначення.
113. Гжонковский Я. Возможности экономии электрической энергии на освещение в Польше. / Я. Гжонковский // Светотехника. – 2012. – № 2. – С. 14-17.
114. Стандарт DIN EN 50285. Енергоефективність електричних ламп побутового призначення, методи вимірювань.
115. Зибаров В. Тенденции развития офисного освещения. / В. Зибаров // Современная светотехника. – 2012. – № 4. – С. 48-51.
116. Миронов С. Мощный рабочий инструмент от компании CREE. / С. Миронов // Современная светотехника. – 2011. – № 3 (10). – С. 29-33.
117. Скобелев В.М. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. / В.М. Скобелев, Е.И. Афанасьева. – М.: Энергия, 1973. – 368 с.
118. Степура В.І. Критерії ефективності вуличного освітлення. / В.І. Степура // Світлолюкс. – 2013. – № 6. – С. 47-52.
119. Кунгс А.Я. Экономия электрической энергии в осветительных установках. / А.Я Кунгс, М.А. Фаермарк. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 159 с.

120. Вайер Б.Г. Энергетические аспекты освещения зданий. / Б.Г. Вайер, Л. Зонневельдт // Светотехника. – 1996. – № 9. – С. 25-28.
121. Кожушко Г.М. Об эффективности компактных люминесцентных ламп. / Г.М. Кожушко // Світлолюкс. – 2003 – № 2. – С. 37-39.
122. Иванов А.П. Электрические источники света. / А.П. Иванов. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 288 с.
123. О новом подходе к расчету срока окупаемости: труды Всерос. научн.-техн. конф., [«Светотехника, электротехника, энергетика»], (Саранск, 19-23 мая 2003 г.) Саранск: СВМО. – 2003. – С. 146-147.
124. Крымов А.В. Анализ экономических показателей полупроводниковых и традиционных источников света. / А.В. Крымов, В.Д. Никитин // Светотехника. – 2012. – № 2. – С. 64-65.
125. Тарасенко М.Г. Методика розрахунку енергоефективності джерел світла. / М.Г. Тарасенко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011 – № 1. – С. 25-34.
126. Майоров М.И. Влияние электродного фактора на изменение характеристик люминесцентных ламп в течение срока службы. / М.И. Майоров, Н.В. Самородова // Тр. ВНИИИС, вып. 8. – Саранск, 1982. – С. 86-89.
127. Тарасенко М.Г. Особливості перехідних процесів попереднього підігрівання електродів люмінесцентних ламп. / М.Г. Тарасенко, В.П. Коваль // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 12-20.
128. ГОСТ 6825-74. Лампы люминесцентные ртутные низкого давления. М.: Изд-во стандартов, 1987. – 40 с.
129. Федоров В.В. Производство люминесцентных ламп. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.
130. ГОСТ 2239-73. Лампы накаливания общего назначения. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. – 34 с.
131. Справочная книга по светотехнике. / Под. ред. Айзенберга. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 526 с.
132. Говоров П.П. Влияние режима напряжения на характеристики источни-

- ков света. / П.П. Говоров, Л.Д. Гуракова // Світлолюкс. – 2003. – № 2. – С. 42-44.
133. Чаплыгин Е.Е. Теория мощности в силовой электронике. / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин. – М.: МЭИ, 2006. – 56 с.
 134. Directive 2002/91/EC on Energy performance of buildings // Official Journal of the European Commission.
 135. EN 15193 «Energy requirements for lighting», August 2007.
 136. Дехофф П. Качество освещения и энергоэффективность не противостоят друг другу. / П. Дехофф // Светотехника – 2012. – № 3. – С. 64-68.
 137. Dehoff P. The Ratio between Lighting Energy Efficiency and User Needs / Proc. 10th European Lighting Conference «Lux Europa», Berlin, 2005.
 138. Dehoff P. ELI – Ergonomic Lighting Indicator, criteria at a glance // Proc. 26th CIE Session, Beijing, 2007.
 139. Dehoff P. The Balance between Human Aspects and Energy Efficiency in Lighting // Proc. IESNA Conf. 2007, Phoenix.
 140. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах. / Дж. Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
 141. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. / Перевод с английского под ред. Рохлина Г.Н. и Фугенфирова М.И. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
 142. Козак К. Залежність номінальних світлових віддач джерел світла від номінальних потужностей / К. Козак, М. Тарасенко // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2013 – № 2 (70) – С. 173-182.
 143. Семенов Б.Ю. Экономичное освещение для всех. / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 224 с. – (Серия «Технологии энергосбережения»).
 144. Catalogue for Original equipment Manufactures Lamps & Gear / Controls 2001 / 2002 Philips.– 489 p.
 145. Osram Product Catalog [Електронний ресурс]. – OSRAM GmbH. – 2010. – Режим доступу: <http://catalog.myosram.com>.

146. Фок М.В. О предельных возможностях повышения световой отдачи источников света. / М.В. Фок // Светотехника. – 1990. – № 6. – С. 1-3.
147. Gree announces a new laboratory LED efficacy milestone at SIL. URL: <http://ledsmagazine.com/news/10/2/16?cmpid=EnlLEDsFebruary> 202013 (дата звернения 15.08.2013).
148. Cree's MK-R LED Offers up to 200 Lumen-Per-Watt // Led Professional Review. – 2013. – Iss. 35.
149. Елисеев Н.П. О предельных световых и цветовых и цветовых характеристиках белых светодиодов. / Н.П. Елисеев, С.П. Решенов // Светотехника. – 2012. – № 4. – С. 12-18.
150. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
151. Rames M.R. et al. Status and Future off High-Power Light – Emmitung Diodes for Solid-State.
152. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.
153. Никифоров С. Реальный цвет и виртуальный индекс его передачи. / С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 2. – С. 18-24.
154. Пустынский И.Н. Аналитическое выражение спектральной чувствительности зрения. / И.Н. Пустынский, Е.В. Зайцева // Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2006». – Томск: ТУСУР, 2006. – С. 146-148.
155. Зайцева Е.В. Погрешности аппроксимации усредненных кривых видности при определении освещенности оптического изображения. / Е.В. Зайцева // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), часть 2. – С. 69-73.
156. Кноринг Г.М. Осветительные установки. / Г.М. Кноринг. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981. – 288 с.
157. Гейхман И.Л. Видение и безопасность. / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. – М.: Энергоиздат, 2009. – 840 с.

158. Виллегас Х.Т. Вопросы энергосбережения в освещении. / Х.Т.Виллегас // Светотехника. – 2007. – № 4. – С. 45-49.
159. Каталог ламп фирмы General Electric «Spektrum». Люминесцентные лампы Polyflux XL. 2001 / 2002. – 12 с.
160. Охонская Е.В. Характеристики разряда в тонких и супертонких люминесцентных лампах / Е.В. Охонская, А.В. Пантелеев, В.К. Самородов // Светотехника. – 2000. – № 5. – С. 21-22.
161. Козак К. Влияние геометрических параметров люминесцентных ламп на их электрические и светотехнические характеристики при постепенном изменении частоты напряжения питания. / К. Козак, Н. Тарасенко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Издание Белорусского национального технического университета. – 2013. – № 5. – С. 38-45.
162. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): Навч. посібник. / Б.О. Пальчевський. – Львів.: Світ, 2001.– 232 с.
163. Рой В.Ф. Работа маломощных люминесцентных ламп на повышенной частоте. / В.Ф. Рой, А.М. Гарьковец // Светотехника. – 1983. – №10. – С. 10-11.
164. Федоренко А.С. О влиянии тока и геометрии сечения на электрические характеристики люминесцентных ламп при питании их от сети повышенной частоты. / А.С. Федоренко, А.М. Троицкий, Г.С. Финогин, Т.В. Мартынова // Труды ВНИИИС. – 1974. вып. 6. – С. 64-69.
165. Майоров М.И. Исследование некоторых электродных характеристик люминесцентных ламп низкого давления на моделях, имитирующих начало и конец срока службы. / М.И. Майоров, Н.В. Самородова, Г.Т. Тимкаева // Светотехника. – 1983. – № 1. – С. 21.
166. Тарасенко М. Прианодні процеси в люмінесцентних лампах. / М. Тарасенко // Вісник Тернопільського національного техн. ун-ту ім. І. Пулюя – 2011. – Том 16, № 2. – С. 152-159.

167. Литвинов В.С. Тепловые источники оптического излучения (теория и расчет). / В.С. Литвинов, Г.Н. Рохлин. – М.: Энергия, 1975. – 248 с.
168. Епанешников М.М. Электрическое освещение. / М.М. Епанешников. М.: Энергия, – 1973. – 352 с.
169. Боос В.Г. Динамика параметров натриевых ламп ВД в процессе эксплуатации в уличных ОУ. / В.Г. Боос, С.А. Гергобиани, М.Е. Клыков, М.В. Лобанов, А.П. Меркулова // Светотехника. – 2013. – № 3. – С. 18-22.
170. ГОСТ 16809–88. Аппараты пускорегулирующие для разрядных ламп. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1989. – 27 с.
171. Тарасенко М.Г. Розвиток теорії і практики проектування пускорегулювальної апаратури для джерел оптичного випромінювання [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.09.07 / Тарасенко Микола Григорович; Харківська національна академія міського господарства. – Х., 2012. – 40 с.
172. Регулювання світлового потоку джерел світла з точки зору енергоефективності: тези доповідей XVII науково-техн. конф. (Тернопіль, 20-21 листопада 2012 р.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Тернопільський національний техн. ун-т. ім. І. Пулюя. – Т.: ТНТУ, 2013. – 145 с.
173. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: Учеб. Для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы». / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – М.: Высш. шк., 1987. – 479 с.
174. Козак К. Особливості електричних, світлотехнічних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових джерел світла. / К. Козак, М. Тарасенко // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2013 – № 4 (72) – С. 227-237.
- 175 <http://www.vdmais.kiev.ua>, каталог науково-виробничої фірми VD MAIS.
176. Причини пульсацій світлового потоку люмінесцентних ламп. Тези до-

- повідей XVI наук. конф. (Тернопіль, 5-6 грудня 2012 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський національний техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2012. – 143 с.
177. M. Shen, Z. Qian, F.Z. Peng. Design of a Two-Stage Low-Frequency Square-Wave Electronic Ballast for HID Lamps.// IEEE Transactions on Industry Application, Vol.39, No.2, 2003, p.p. 424-430.
 178. Мариничев Д.В. Об особенностях конструкции и параметрах системы охлаждения мощного осветительного прибора со светодиодами. / Д.В. Мариничев, Л.В. Низовский, В.Н. Орловский // Светотехника. – 2013. – № 3. – С. 29-32.
 179. Шевырева А. Решение Sunon для охлаждения мощных светодиодов. / А. Шевырева // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 3. – С. 32-33.
 180. Особливості основних характеристик напівпровідникових джерел світла: збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конф. молодих вчених та студентів [«Актуальні задачі сучасних технологій»] (Тернопіль, 11-12 грудня 2013 р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський національний техн. ун-т. ім. І. Пулюя. – Т.: ТНТУ, 2013. – 373 с.
 181. Griffiths T. LED Lighting Getting Away From Binning / T. Griffiths // www.sslighting/dokuments/articles/news/120304.html
 182. www.heisedu.
 183. www.osram.com.
 184. www.speclampa.ru
 185. Козак К.М. Комплексний підхід щодо визначення енергоефективності джерел світла / К.М. Козак, М.Г. Тарасенко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1 (33). – С. 27-36.
 186. Комплексний підхід щодо визначення енергоефективності джерел світла: матеріали V Міжнарод. научно-техн. конф. в рамках Светотехнического международного форума «*LEDLIGHT 2013*» [«Современные

- тенденции развития светотехники»] (Харьков, 15-16 мая 2013 г.) / М-во образования и науки Украины, Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – 133 с.
187. Solid State Lighting: Brilliant Solutions for America's Energy Future, U.S. Department of Energy, New York, N.Y., April 2009.
 188. Weinert J., Spaulding C., LED Lighting Explained (Understanding LED Sources, Fixtures, Applications and Opportunities), Philips Solid – State Lighting Solutions, Washington, D.C. 2010.
 - 189 Janiga P., Gašparovsky D., Measurement of power characteristics in public lighting networks, „Przegląd Elektrotechniczny” 6/2013, 324–327.
 - 190 Pawlak A., Przyszłość oświetlenia elektrycznego – poprawa efektywności energetycznej, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka” 3/2009, 18–21.
 - 191 Putz Ł., Nawrocki R., Energy efficiency analysis of lighting installations using LED technology, „Przegląd Elektrotechniczny” 6/2013, 296–298.
 - 192 Rajacki K., Zaremba K., Oświetlenie w przemyśle w kontekście energooszczędności, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 6/2011, 45–51
 - 193 Ильна Е. Применимость светодиодов в наружном освещении с точки зрения визуального восприятия. / Е. Ильина. – Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 4. – 2010. – С. 50-55.
 - 194 Тарасенко М.Г. Розрахунок технічних та експлуатаційних параметрів ламп розжарення в електричних колах довільної конфігурації. / М.Г. Тарасенко, В.В. Гончар // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – № 3. – С. 135-140.
 195. Mikołaj Karpiński, Kateryna Kozak. Energy efficiency regulation of the light source's luminous flux // Pomiary * Automatyka * Robotyka (PAR) miesiecznik naukowo-techniczny. – Warszawa. – 2013. – № 11. – 79-83.
 196. Никифоров С. Исследование светодиодов средней мощности от Samsung / С. Никифоров / CHIP NEWS Украина.– 2013. – № 4. С. 47-50.
 197. Щеглов С. Основы формирования углового распределения силы света при конструировании ПСП / С. Щеглов, Д. Николаев // Полупроводни-

- ковая светотехника. – 2010. – № 2. – С. 42-45.
198. Дюэ. Д. Светильники со светодиодами с пониженной блескостью для эргономичного офисного освещения. / Д. Дюэ // Светотехника – 2013. – № 1. – С. 23-25.
 199. Патент на корисну модель 84782 України МПКF21S 13/00. Світильник / Тарасенко М.Г., Козак К.М.; заявник М.Г. Тарасенко, К.М. Козак, власник Тернопільського національний технічний університет імені Івана Пулюя. – и 2013 07585; заявл. 14.06.2013; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20. – 2 с.: рис.
 200. US Department of Transportation Nationale Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Traffic Satety Fact, 2010. URL: <http://www-ndr.nhtsa.Dot.gov> (дата звернення 20.09.2013).
 201. Лунчев В.А. Современные традиционные и светодиодные технологии для уличного освещения: «за» и «поротив». / В.А. Лунчев // Светотехника. – 2013. – № 5-6. – С. 18-23.
 202. Ильина Е. Наружное светодиодное освещение автомагистралей и улиц городов. / Е. Ильина, А. Стратиенко // Полупроводниковая светотехника – 2010. – № 3 – С. 39-41.
 203. Ильина Е. Наружное светодиодное освещение автомагистралей и улиц городов. / Е. Ильина // Полупроводниковая светотехника – 2010. – № 6 – С. 36-39.
 204. Никифоров С. Некоторые аспекты восприятия светодиодного излучения глазным аппаратом на примере приборов световой ж/д сигнализации на основе светодиодов. // Полупроводниковая светотехника – 2009. – № 2 – С. 34-37.
 205. Морант П. Сравнительные возможности осветительной системы, учитывающей особенности сумеречного зрения / П. Морант // Современная светотехника – 2010. – № 4. – С. 21-27.
 206. Eloholma E. MOVE-mesopic Optimisation of Visual Efficiency. Performance based model for mesopic photometry / E. Eloholma, L. Halonen //

Espoo. Finland. – 2005.

207. Пуолакка М. Фотометрия в условиях сумеречного зрения – новая рекомендованная МКО система / М. Пуолакка, Л. Халонен // Светотехника – 2013. – № 1. – С. 18-22.
208. Ливенцов Н.М. Курс физики (основы высшей математики, механика и молекулярные явления, колебания и акустика, электричество, магнетизм и оптика). Учебник для ВУЗов – 6-е изд. доп. М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.

Додаток А

Додаток Б

Додаток В

Додаток Г