

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

На правах рукопису

Поталіцин Сергій Юрійович



УДК 628.971: 351.811.111.5

**Розробка науково-технічних основ впровадження компактних
люмінесцентних ламп в системи зовнішнього освітлення**

Спеціальність 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук
професор Андрійчук В.А.

Тернопіль – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП	4
 РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	
1.1. Стан зовнішнього освітлення населених пунктів України.....	9
1.2. Аналіз методів світлотехнічного розрахунку оптичних систем СП.....	19
1.3. Моделі та методи розрахунку освітлення вулиць.....	23
1.4. Аналіз впливу температури на світлотехнічні характеристики КЛЛ та СП із КЛЛ.....	25
1.5. Вплив КЛЛ на показники якості електроенергії та точність засобів її обліку.....	31
 РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ З КОМПАКТНИМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИМИ ЛАМПАМИ	
2.1. Аналіз світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення із різнотипними джерелами світла.....	34
2.2. Моделювання світлового поля КЛЛ.....	41
2.3. Світлотехнічний розрахунок дзеркального відбивача СП із заданими розмірами джерела світла.....	50
2.4. Розрахунок фотометричного тіла СП, що забезпечує нормативні показники якості освітлення дорожнього покриття.....	55
2.5. Світлотехнічний розрахунок СП із КЛЛ для вуличного освітлення.....	62
2.6. Аналіз світлотехнічних параметрів СП із КЛЛ при зміні геометричних розмірів світлого тіла ДС.....	67

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК УСТАНОВКИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СП ІЗ КЛЛ

- 3.1. Математична модель для розрахунку освітлювальної установки зовнішнього освітлення..... 75
- 3.2. Розрахунок установки вуличного освітлення із використанням СП із КЛЛ..... 83

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНИХ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

- 4.1. Дослідження світлотехнічних параметрів КЛЛ при зміні температури зовнішнього середовища..... 93
- 4.2. Комп'ютерне моделювання теплового режиму СП зовнішнього освітлення із КЛЛ..... 103

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ІЗ КОМПАКТНИМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИМИ ЛАМПАМИ

- 5.1. Дослідження гармонійного складу струму асортименту КЛЛ, представлених на ринку України..... 110
- 5.2. Облік електричної енергії, спожитої ОУ з КЛЛ в системах зовнішнього освітлення..... 118

ВИСНОВКИ..... 130

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 132

ВСТУП

Актуальність теми. Зовнішнє освітлення є важливою складовою благоустрою населених пунктів країни. Якісне зовнішнє освітлення дозволяє підвищити безпеку руху автомобільного транспорту та пішоходів, знизити рівень вандалізму та крадіжок, що в свою чергу призводить до зниження матеріальних та людських втрат.

На сьогоднішній день в значній частині населених пунктів України зовнішнє освітлення є енергозатратним або практично відсутнім. Це в першу чергу стосується сільської місцевості та периферійних районів міст. Такий стан сфери зовнішнього освітлення зумовлений недостатнім рівнем фінансування. Як наслідок вже в існуючих світлотехнічних установках використовуються застарілі, зношені світлові прилади із низькоефективними джерелами світла (ДС), що зумовлює нераціональне використання електричної енергії та низький рівень кількісних та якісних показників освітлювальних установок (ОУ).

Одним із способів підвищення енергетичної ефективності ОУ зовнішнього освітлення є заміна низькоефективних ДС (таких, як лампи розжарювання та дугові ртутні лампи) на компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) потужністю 35-240 Вт з досить високими значеннями світловіддачі (50-80 лм/Вт), можливістю «теплого запуску» та діапазоном робочих температур від -30 до $+45$ °С.

Питаннями проектування та енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення і світлотехнічних характеристик КЛЛ займалися ряд провідних вчених: Айзенберг Ю.Б., Кожушко Г.М., Харченко В.Ф., Куш О.К., Schruben J. S., Keller J.B. та ін.

Залишилися не вирішені задачі розрахунку світлових приладів (СП) з ДС із заданими розмірами світлого тіла, якими є КЛЛ та поведінка даних джерел світла в умовах замкнутого середовища СП.

Тому проблема розробки науково-технічних основ впровадження КЛЛ в системи зовнішнього освітлення є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової теми “Регулювання потужності розрядних джерел світла енергоощадними електронними пускорегулювальними апаратами” (номер державної реєстрації 0111U005287).

Мета й завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення за рахунок впровадження СП із КЛЛ. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

1. Аналіз світлотехнічних систем зовнішнього освітлення, визначення основних факторів, що впливають на якісні показники та енергетичну ефективність ОУ;

2. Розробка методики розрахунку СП із заданими розмірами світлого тіла ДС та проведення на її основі розрахунку світлового приладу з КЛЛ;

3. Побудова моделі освітлення для різного типу вулиць, проведення розрахунку світлотехнічних параметрів ОУ та розробка рекомендацій для практичного впровадження КЛЛ в системах зовнішнього освітлення;

4. Дослідження характеристик компактних люмінесцентних ламп при зміні температури навколишнього середовища та проведення аналізу теплового режиму СП із КЛЛ;

5. Дослідження впливу КЛЛ на показники якості електричної енергії в системах зовнішнього освітлення та розробка рекомендацій щодо їх покращення.

Об'єкт дослідження – процеси в системах зовнішнього освітлення населених пунктів.

Предмет дослідження – світлові прилади та світлотехнічні установки зовнішнього освітлення із компактними люмінесцентними лампами.

Методи дослідження. Поставлені завдання вирішувалися на основі:

- а) використання стандартних фотоелектричних методів фотометрії;
- б) методів 3D моделювання при проектуванні та виготовленні СП;
- в) використання методів аналізу та математичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Числові розрахунки та моделювання проводилися з використанням програмних засобів MatLab, SolidWorks, TracePro.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель та проведено розрахунок оптичної системи світлового приладу із світним тілом заданих геометричних розмірів.

2. Отримала подальший розвиток математична модель для розрахунку світлового поля КЛЛ, що враховує специфіку її геометричних розмірів.

3. Побудовано модель освітлення вулиць, що дозволяє розраховувати якісні та кількісні показники ОУ для їх різних категорій.

4. Встановлено, що при температурі зовнішнього середовища від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура ЕПРА КЛЛ в СП зовнішнього освітлення не перевищує $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає допустимій робочій температурі.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено методику розрахунку СП із заданими розмірами світного тіла ДС. На її основі проведено розрахунок та виготовлено відбивач СП для зовнішнього освітлення, в якому використано лампу КЛЛ.

2. Запропоновано методику та розроблено програмне забезпечення для розрахунку освітлювальної установки з СП із КЛЛ при проектуванні системи вуличного освітлення.

3. Удосконалено методику визначення відносної похибки індукційного та електронного лічильників залежно від показників якості електроенергії.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отриманні автором самостійно. У [104] удосконалено

методику вимірювання відносної похибки індукційного та електронного лічильників, яка враховує показники якості електроенергії. У [1, 2, 3] проведено аналіз енергетичної ефективності зовнішнього освітлення регіонів України. У [84] проведено моделювання СП з неточковим ДС. У [91] здійснено експериментальні дослідження енергетичної ефективності СП для зовнішнього освітлення із різнотипними ДС. У [92] розроблена математична модель та проведено розрахунок оптичної системи світлового приладу із світним тілом заданих геометричних розмірів. У [14] проведено аналіз стану зовнішнього освітлення населених пунктів сільської місцевості. У [85] проведено моделювання світлового поля КЛЛ з спіральною формою світного тіла та створено програмне забезпечення для розрахунку освітленості від даного ДС. У [4] проведено експериментальні дослідження та статистичну обробку результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації оприлюднені та обговорені на:

1. XV науково-технічній конференції, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р.);

2. IV Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (м. Тернопіль, 24 - 26 квітня 2012 р.);

3. V Міжнародній науково-технічній конференції «Современные тенденции развития светотехники» (Харків, 15-16 травня 2013 р.);

4. XVII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 20-21 листопада 2013 р.);

5. V Міжнародній науково-технічній конференції «Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці МЕЕС 14» (Київ, 1-3 жовтня 2014 р.);

6. XVIII науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 29-30 жовтня 2014 р.).

Публікації. Результати наукових досліджень опубліковані у 10 наукових працях, з яких 7 – у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України як фахові (у тому числі 1 стаття у закордонному фаховому виданні), 6 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 118 найменувань на 12 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 144 сторінки, з них 127 основного тексту, 92 рисунка та 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

1.1. Стан зовнішнього освітлення населених пунктів України

Для характеристики світлотехнічних систем зовнішнього освітлення проведено аналіз освітлювальних установок по областях України за період з 2010 по 2015 роки включно [1 – 9]. При цьому показники сфери зовнішнього освітлення для таких регіонів України як АР Крим, Луганська та Донецька області в період з 2014 по 2015 рік були відсутні, тому бралися показники за 2013 рік.

Розвиток інфраструктури мереж зовнішнього освітлення характеризується загальною протяжністю мереж зовнішнього освітлення. Починаючи з 2010 року вона зростала в середньому на 4,1 % за рік (рис. 1.1). Цей показник станом на 01.01.2016 року становив 102 тис. км.

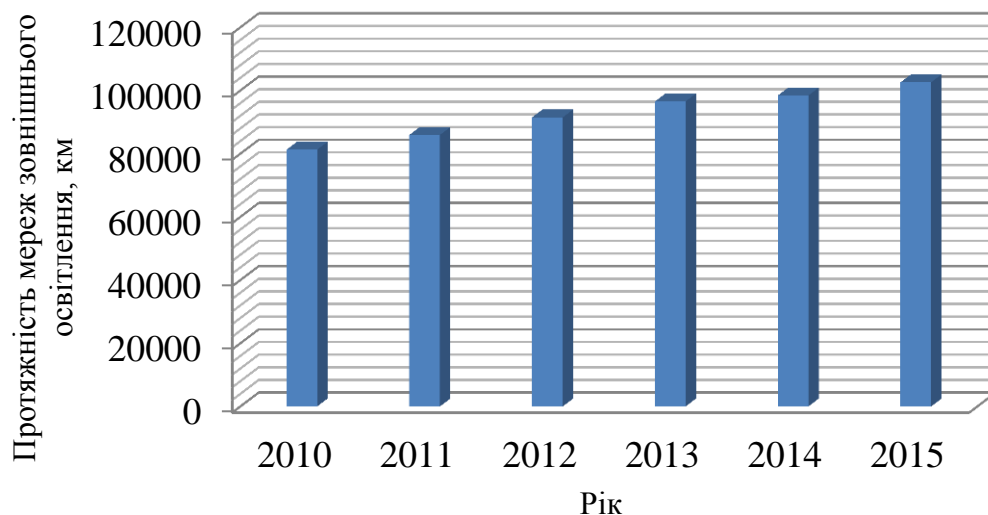


Рис. 1.1. Гістограма загальної протяжності мереж зовнішнього освітлення населених пунктів України станом на 01.01.2016

В табл. 1.1 представлено протяжність мереж зовнішнього освітлення по областях України.

Таблиця 1.1

Протяжність мереж зовнішнього освітлення по областях України, км

№ п/п	Адміністративно-територіальний поділ	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	АР Крим	3742,2	3742,2	3176,9	3222,1	3222,1	3222,1
2	Вінницька	1770,6	2837,4	3006,5	3973,1	4153,1	4373,1
3	Волинська	636,3	703,9	976,5	1067	1187,8	1190,8
4	Дніпропетровська	8216	8216	9277,5	9525,7	9482,6	9766,4
5	Донецька	7581,9	7958,2	8234	8448	8448	8448
6	Житомирська	1877,2	1885,3	1894,3	1894,3	1942,4	1968,2
7	Закарпатська	2454,1	2595,4	2898,4	2909,8	2964,1	3569,5
8	Запорізька	2804,2	4045,3	4047	4276,9	3682,6	3707,1
9	Івано-Франківська	1206,7	1211,8	1212	1221,7	1223,8	1887,1
10	Київська	6834	6969,5	7037,3	7152,7	7247,6	7342,6
11	Кіровоградська	1765,2	2332	2755,9	3075,9	3198,7	3342,7
12	Луганська	3899,5	3826,3	3858,4	3900,1	3900	3900
13	Львівська	2395,8	2427,9	3012,8	3230,7	3362,	3503,5
14	Миколаївська	3854	3881	3881	3893	4013	4013
15	Одеська	5889,1	5273,9	5103	5106,6	5634,4	5730,5
16	Полтавська	2711,4	2837,8	2844	2934	3024,8	3368,2
17	Рівненська	1180	1324,9	1459,1	1811,3	1852,1	1987,8
18	Сумська	2772,3	3090,8	3529,4	4017,5	4262,3	4525,4
19	Тернопільська	1270,6	1436,9	1574	1645,1	1728,7	1761,7
20	Харківська	5673	5971	6368	6740	6806	6780
21	Херсонська	827,5	827,5	899	874,4	899	909,8
22	Хмельницька	1779,1	1700,6	2554,8	2555,6	2504,5	2962,8
23	Черкаська	2153,9	2897,9	3450,0	4439,2	4969,4	5580,2
24	Чернівецька	1123,4	1151,3	1392,5	1487,6	1489,6	1528,3
25	Чернігівська	2131,1	2171,1	2211,8	2269,8	2309,9	2309,9
	м.Київ	3920,8	3825,3	4068	4053,5	4118,4	4131,3
	м. Севастополь	773,9	773,9	773,9	777,23	777,23	777,23
	Всього по Україні	81243	85915,1	91496,1	96502,9	98404,6	102588

По всіх областях України спостерігається зростання протяжності мереж зовнішнього освітлення, окрім Одеської області, де цей показник знизився в 2015 році на 3% в порівнянні із 2010 роком.

Станом на 01.01.2016 року протяжність вулиць та доріг із штучним освітленням становить 65,0 тис. км. (26 % від загальної протяжності доріг). Цей показник зріс лише на 2 % протягом періоду з 2012 по 2015 роки [10 – 13]. Таким чином, збільшення протяжності мереж зовнішнього освітлення відбувається з малою інтенсивністю.

Із збільшенням протяжності мереж зовнішнього освітлення збільшується кількість світлоточок. Загальна кількість світлоточок, що експлуатуються в мережах зовнішнього освітлення починаючи з 2010 року, зростала в середньому на 4,5 % (рис. 1.2). Цей показник станом на 01.01.2016 року становив 2224,7 тис. шт.

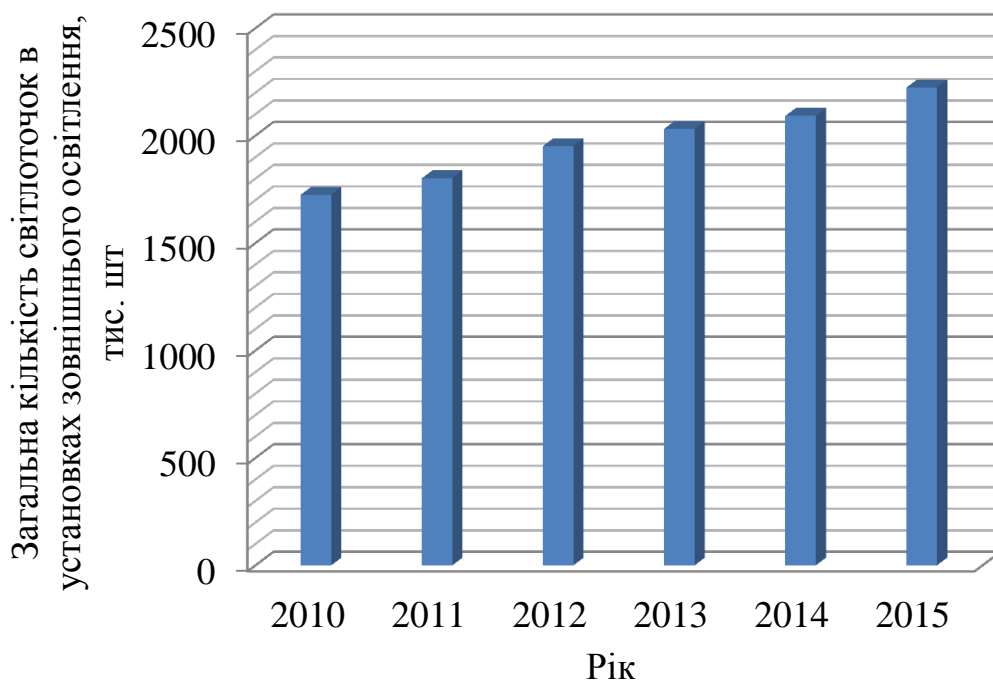


Рис. 1.2. Гістограма кількості світлоточок станом на 01.01.2016 в мережах зовнішнього освітлення

Оцінку впровадження енергоефективних джерел світла проведено на основі аналізу зміни кількості світлоточок за типами джерел світла (рис. 1.3).

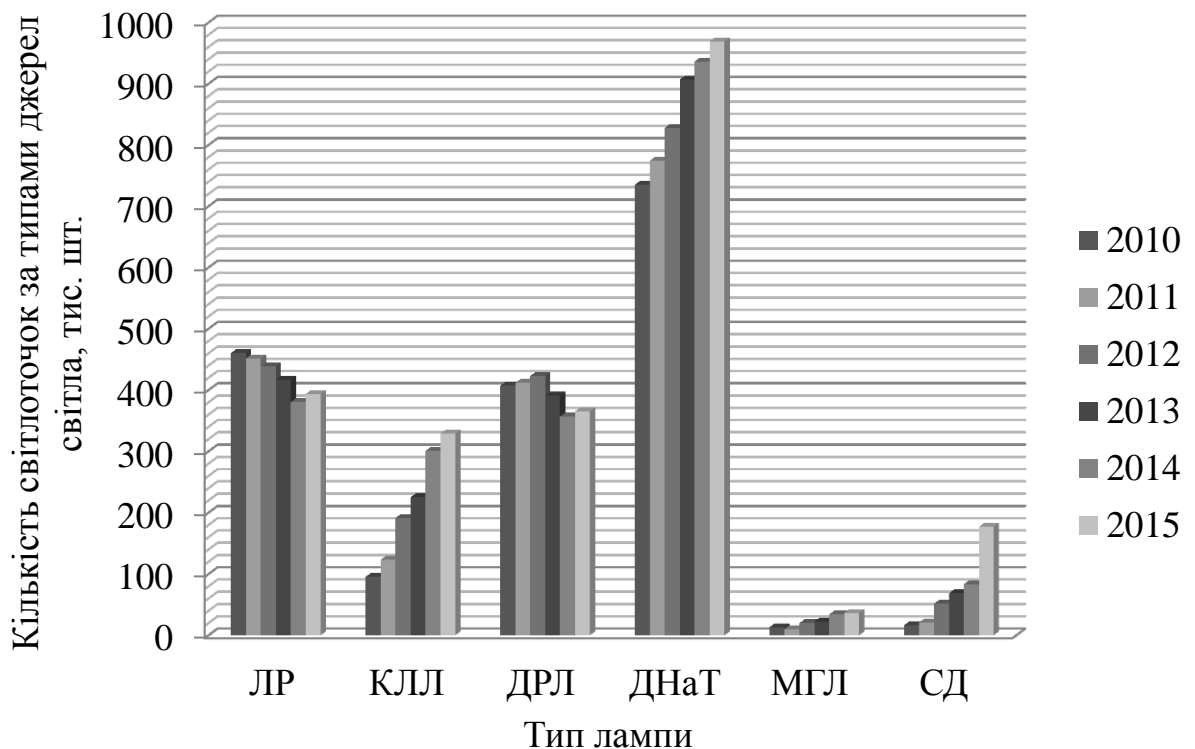


Рис. 1.3. Гістограма кількості світлоточок за типами джерел світла станом на 01.01.2016 в мережах зовнішнього освітлення

Станом на 01.01.2016 року кількість ЛР і ДРЛ в установках зовнішнього освітлення становить 393,59 та 365,31 тис. шт., відповідно, що на 66,78 (16 %) та 41,8 (10 %) тис. шт. менше в порівнянні із відповідними показниками 2010 року.

Кількість КЛЛ, ДНаТ та СД станом на 01.01.2016 рік становила 328,93, 969,28 та 176,89 тис. шт., відповідно. Ці показники зросли протягом останніх п'яти років на 233,61 (71 %), 234,05 (24 %) та 160,5 (91 %) тис. шт.

Для більш детального дослідження впровадження енергоефективних джерел світла проведено аналіз зміни кількості світлоточок за типами джерел світла по областях України (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Кількість світлоточок за типами джерел світла по областях України, тис. шт.

№ п.п.	Адміністративно-територіальний поділ	ЛР		КЛЛ		ДРЛ		ДНаТ		МГЛ		СД	
		2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015
1	АР Крим	13,55	16,25	4,07	11,47	17,13	19,52	25,99	31,53	0,15	0,47	0,46	1,05
2	Вінницька	3,85	6,148	4,42	15,124	3,63	5,489	23,68	34,055	0,00	0,659	0,00	4,223
3	Волинська	11,13	9,511	10,36	13,914	4,65	5,904	0,00	13,633	0,00	0,272	0,00	0,082
4	Дніпропетровська	77,35	44,81	3,91	46,54	39,98	28,73	55,14	87,81	0,26	0,6	0,10	3,03
5	Донецька	32,56	11,193	5,69	8,551	33,00	12,162	87,22	44,671	1,15	0,193	0,34	1,649
6	Житомирська	18,05	11,769	2,52	2,739	7,10	4,1	8,50	14,529	1,50	1,63	2,46	5,346
7	Закарпатська	20,39	17,01	0,67	4,736	13,13	13,899	13,32	15,667	0,00	0,226	0,00	0,826
8	Запорізька	25,17	10,91	4,70	16,39	28,85	11,31	49,40	41,41	0,25	6,18	0,12	1,03
9	Івано-Франківська	12,92	6,183	0,00	0,581	8,81	7,41	12,92	14,31	0,00	0	0,00	0,966
10	Київська	13,40	15,86	14,70	22,35	51,15	28,65	20,30	33,6	0,16	2,4	0,04	1,36
11	Кіровоградська	11,45	14,701	2,12	8,344	2,99	6,032	7,41	11,79	0,00	5,964	0,00	0,055
12	Луганська	23,30	19,12	3,40	9,1	9,50	9,12	24,20	28,05	0,07	0,02	0,20	0,72
13	Львівська	11,21	15,86	0,00	5,425	16,38	9,674	37,03	42,875	0,05	6,745	0,00	2,27
14	Миколаївська	10,86	9,792	0,10	0,1	13,17	9,857	13,88	22,439	0,00	0,056	0,00	3,304
15	Одеська	45,32	40,55	20,40	48,7	31,85	13,65	70,42	49,3	4,40	0,9	0,42	4,25
16	Полтавська	11,10	10,9	2,65	9,69	10,21	36,82	28,45	39,42	0,18	0,66	0,10	3,45
17	Рівненська	2,34	2,823	5,93	11,375	6,38	8,659	10,13	12,575	0,14	0,237	0,07	0,439
18	Сумська	27,96	22,77	3,02	9,191	5,02	7,17	10,59	25,161	0,22	0,16	0,09	1,64
19	Тернопільська	5,87	7,78	0,52	2,61	5,45	6,205	8,73	11,038	0,00	0,212	0,13	0,356
20	Харківська	33,13	50	2,53	13,5	27,47	28,337	54,51	74,77	0,40	0,664	0,15	2,045
21	Херсонська	6,70	2,6	0,2	0,2	3,80	5,5	4,80	7,1	0,01	0,2	0,06	0,1
22	Хмельницька	11,31	10,239	0,48	3,054	11,05	14,904	14,26	27,942	1,05	0,316	0,00	1,974
23	Черкаська	8,74	6,1	0,00	24,64	10,23	14,69	9,55	14,07	0,00	1,12	0,00	0,65
24	Чернівецька	6,90	3,598	0,79	3,751	4,40	2,9	16,98	20,98	0,99	0,678	0,19	0,222
25	Чернігівська	12,20	10,3	0,00	4,8	12,90	10,3	16,80	29,1	0,20	0,7	0,00	0,17
	Всього	460,37	416,57	95,32	225,05	407,11	391	735,22	906,78	13,09	22,54	16,39	68,4

Із табл. 1.2 в видно, що кількість ЛР та ДРЛ в період з 2010 по 2015 рік зросла в Вінницькій, Київській, Кіровоградській, Львівській, Рівненській, Тернопільській та Харківській областях. Тобто розширення мереж зовнішнього освітлення в даних регіонах країни відбувалося частково за рахунок низькоефективних джерел світла. При цьому в більшості областей України частка цих джерел світла знижується, що є позитивним чинником.

Одним з найважливіших показників зовнішнього освітлення є кількість спожитої електроенергії. Гістограма загальної кількості спожитої електричної енергії в установках зовнішнього освітлення представлена на рис. 1.4.

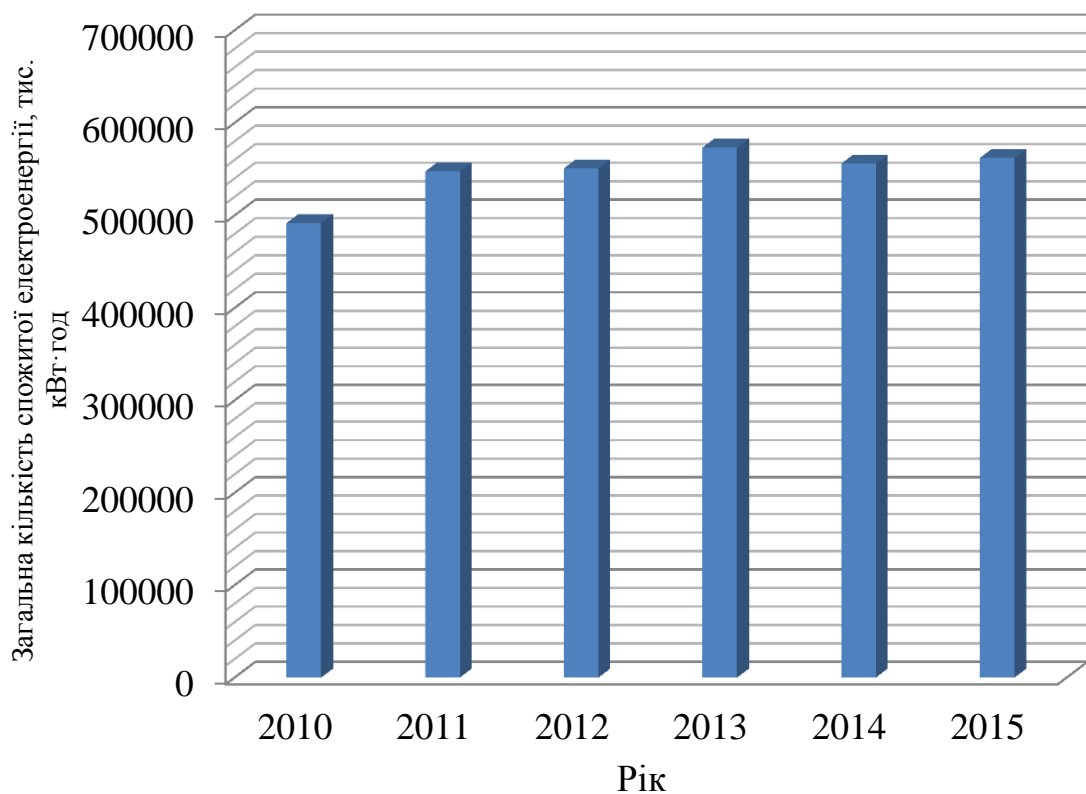


Рис. 1.4. Гістограма загальної кількості спожитої електричної енергії станом на 01.01.2016 в установках зовнішнього освітлення

Із рис. 1.4 випливає, що з кожним роком в період з 2010 по 2013 рік кількість спожитої електричної енергії в установках зовнішнього освітлення

зростає в середньому на 4,7 %. Після 2013 року цей показник практично не змінювався навіть при зростанні кількості світлоточок. Це зумовлено зменшенням кількості електроенергії, спожитої однією світлоточкою (рис. 1.5).

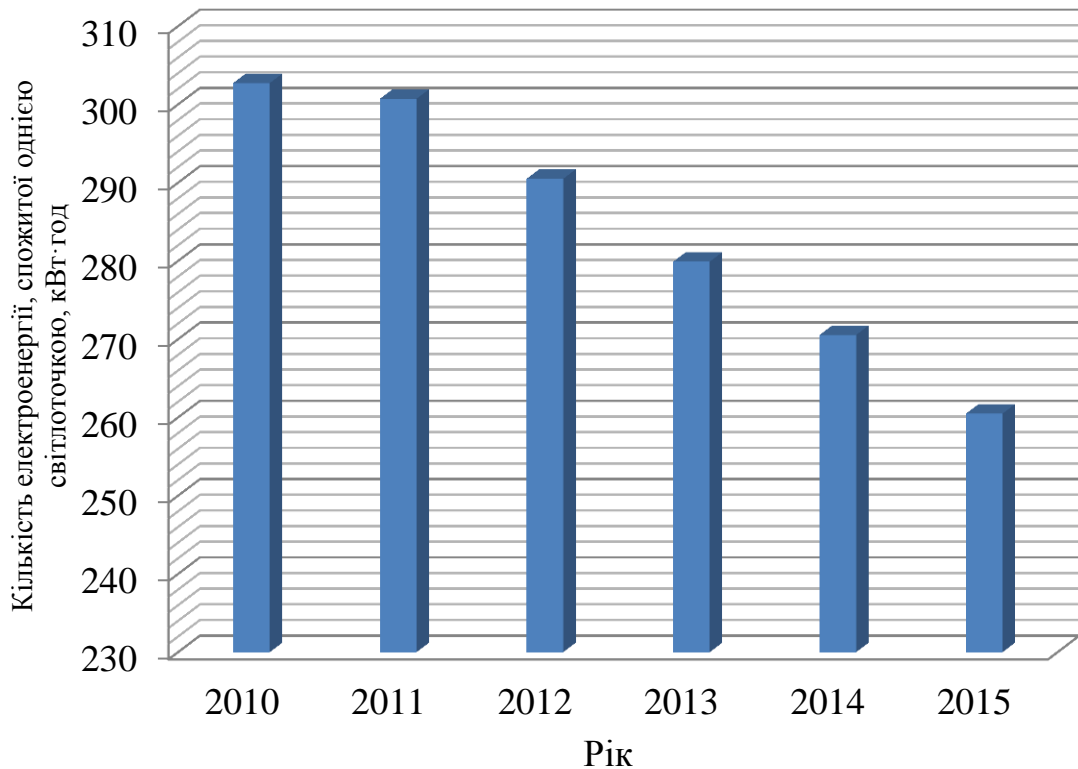


Рис. 1.5. Гістограма кількості електроенергії, спожитої однією світлоточкою в установках зовнішнього освітлення станом на 01.01.2016

Із рис. 1.5 слідує, що кількості електроенергії, спожитої однією світлоточкою, з кожним роком зменшується в середньому на 3,2 %.

Узагальнивши дані статистичної звітності показників сфери зовнішнього освітлення по областях України протягом останніх п'яти років можна відзначити такі основні позитивні риси:

- зросла протяжність мереж зовнішнього освітлення на 20,8 %;

- збільшилась кількість світлоточок, що працюють в сфері зовнішнього освітлення на 22,4 %;

- збільшилася частка енергоефективних ДС (КЛЛ, ДНаТ та СД) до значення 64,9 % від загальної кількості світлоточок;

- знизилась кількість електричної енергії, спожитої на роботу однієї світлоточки на 14 %.

Поряд із позитивними зрушеннями залишається ще багато невирішених проблем:

- збільшення протяжності мереж зовнішнього освітлення відбувається з малою інтенсивністю і складає в середньому 4,1 % за один рік. При цьому приріст цього показника в деяких областях України складає всього лиш 1 % або взагалі є від'ємним;

- в системах зовнішнього освітлення ще досить широко використовують малоефективні ДС, такі як ЛР та ДРЛ, які становлять 33,4 % від загальної кількості світлоточок. В деяких регіонах зростання кількості світлоточок частково забезпечується за рахунок подальшого впровадження цих джерел світла, що зумовлює збільшення енергозатратності установок зовнішнього освітлення;

- протяжність вулиць та доріг із штучним освітленням становить всього лиш 26 % і за останні 5 років цей показник зріс на 2 %. При цьому найбільш гостро проблема освітлення постає в більшості житлових районів невеликих міст та сіл, де воно практично відсутнє [14].

Із вище представлених даних слідує, що мережі зовнішнього освітлення розвиваються дуже повільно. Основними чинниками, що сприяють такому стану підгалузі, є недостатнє виконання місцевою владою вимог Закону України «Про благоустрій населених пунктів» в частині фінансування цієї сфери, що не дає можливості належного проведення

заходів з модернізації та переоснащення мереж зовнішнього освітлення (рис. 1.6).

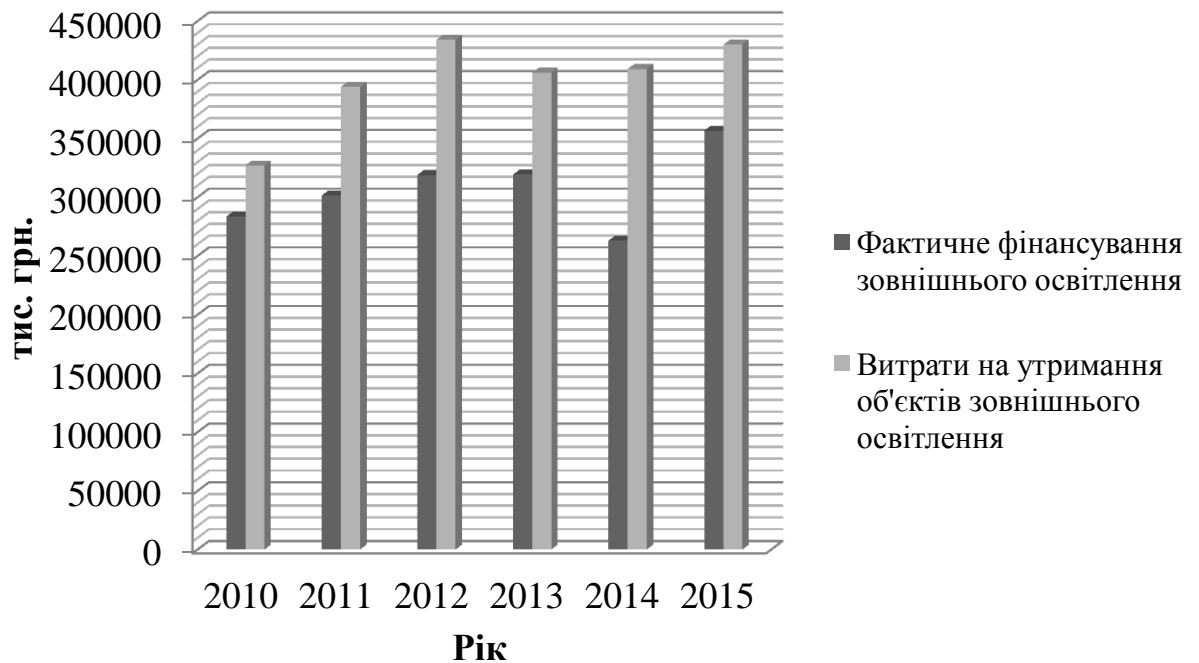


Рис. 1.6. Порівняльна гістограма фінансування та витрат у зовнішньому освітленні

В значній частині населених пунктів зовнішнє освітлення або відсутнє, або недостатнє. Особливо гостро стоїть проблема в житлових районах невеликих міст та сільській місцевості [15].

Станом на 01.01.2014 року частка сільських населених пунктів, які освітленні не повністю, складає в середньому 14 % від загальної кількості по Україні (табл. 1.3). При цьому в 46,1 % сільських населених пунктів освітлення відсутнє взагалі [16].

Відсутність освітлення різко підвищує кількість дорожньо-транспортних пригод за участю пішоходів [17].

Таблиця 1.3

Зовнішнє освітлення сільських населених пунктів

№ п.п.	Адміністративно- територіальний поділ	освітленні не повністю	без освітлення
		у % від загальної кількості сільських населених пунктів	
1	Вінницька	11,3	47,1
2	Волинська	11,3	40,8
3	Дніпропетровська	5,5	57,4
4	Донецька	9	55,2
5	Житомирська	21	57,3
6	Закарпатська	11,7	18,5
7	Запорізька	3,4	49
8	Івано-Франківська	20,3	28,6
9	Київська	2,6	37,6
10	Кіровоградська	15,4	43,6
11	Луганська	17,1	65,6
12	Львівська	34,3	44,1
13	Миколаївська	8,8	27
14	Одеська	11,7	43,3
15	Полтавська	9,3	53,5
16	Рівненська	5,8	66,3
17	Сумська	22,9	39,2
18	Тернопільська	7,2	25,2
19	Харківська	14,8	42,8
20	Херсонська	7,1	66,7
21	Хмельницька	19,8	48,3
22	Черкаська	4	25,6
23	Чернівецька	25,6	14,8
24	Чернігівська	18,6	63,1
Всього		14	46,1

Основним шляхом підвищення енергетичної ефективності та зниження витрат в зовнішньому освітленні є впровадження високоефективних ДС. Одним із таких ДС є КЛЛ, які доцільно використовувати в системах зовнішнього освітлення малих міст та сільських населених пунктів. Тому розробка науково-технічних основ впровадження КЛЛ в системи зовнішнього освітлення є актуальною.

1.2. Аналіз методів світлотехнічного розрахунку оптичних систем СП

Найважливішим етапом проектування світлового приладу є етап світлотехнічного розрахунку, оскільки його результати значною мірою визначають форму і розміри оптичної системи світлового приладу, а також його світлотехнічні параметри [18]. Мета світлотехнічного розрахунку полягає у визначенні параметрів оптичної системи СП залежно від геометричних розмірів та світлотехнічних параметрів джерела світла, що буде забезпечувати необхідні фотометричні характеристики СП.

На даний час використовують два підходи до світлотехнічного розрахунку СП. Перша група методів базується на розрахунку світлового потоку $\Delta\Phi$, що випромінюється СП в різні зони простору $\Delta\omega$ або на різні ділянки ΔA поверхні, що освітлюється. Вони ґрунтуються на припущенні, що світне тіло ДС є точковим. Це робиться для спрощення визначення меж в просторі поширення світлових потоків $\Delta\Phi$ від різних ділянок оптичної частини. При цьому розподіл світлового потоку від СП в деяку зону простору вважається рівномірним. Зазначені припущення дають задовільний результат лише в разі відносно малого розміру світного тіла, що має приблизно однакову силу світла в різних напрямках. Якщо ж даними методами враховувати форму і розміри світного тіла джерела, то розподіл

світлового потоку визначається з великими похибками, а самі розрахунки стають надзвичайно громіздкими.

Друга група методів базується на розрахунку площі A та яскравості L частини відбивача СП, видимої з деякого напрямку α (рис. 1.7,а) або з деякої точки m (рис. 1.7,б). У першому випадку визначається розподіл сили світла $I_\alpha = \rho L A_\alpha$, у другому випадку – освітленість $E = \rho L \Delta \bar{\omega}_{np}$, де $\Delta \bar{\omega}_{np}$ – проекція тілесного кута.

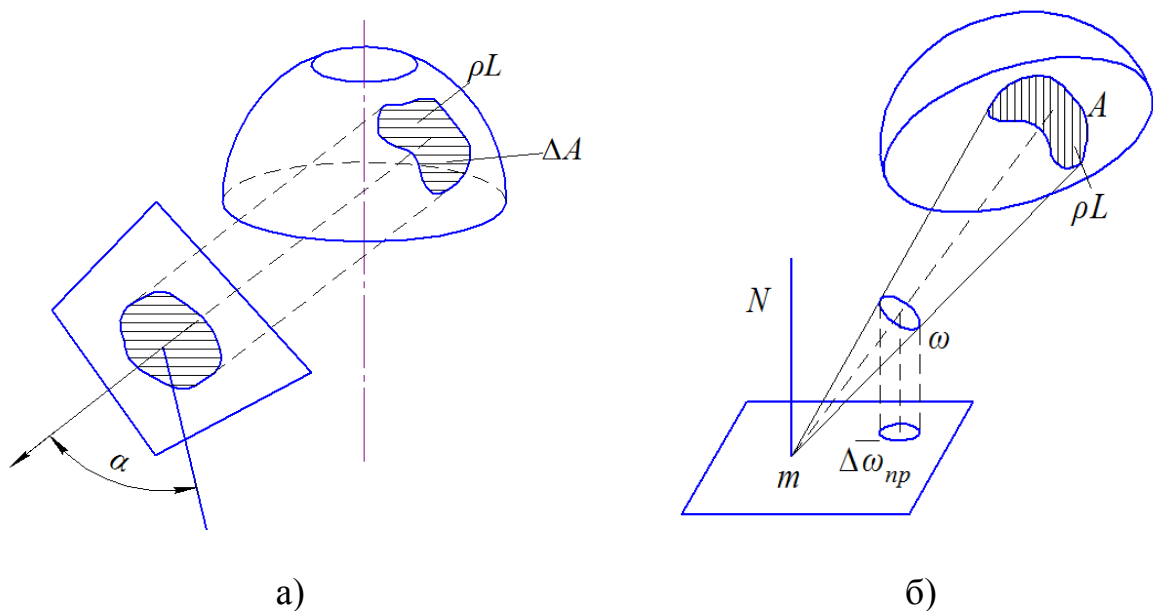


Рис. 1.7. Розрахунок СП а) за методом площі та яскравості світної частини;
б) за методом світної частини

У роботі [19] автор групує методи розрахунку дзеркального відбивача за ознаками: точкові ДС та протяжні ДС із кінцевими розмірами. Основну увагу приділено методам другої групи. В роботах [20, 21] ці методи були доповненні застосуванням ЕОМ

Розрахунок форми дзеркального відбивача по заданому світлорозподілу для точкового ДС вперше в загальному вигляді було сформульовано в 30-х роках Н.Г. Болдиревим и В.Д. Комісаровим [22, 23].

При цьому розрахунок здійснювався через визначення функції необхідного ходу променів або рівняння балансу потоків [24 – 28].

Широко відомий метод елементарних відображень розрахунку СП із протяжним ДС, який ефективно застосовувався протягом багатьох років в інженерній практиці [18, 29]. За винятком окремих випадків метод елементарних відображень пов'язаний з великим числом графічних побудов. З введенням в інженерну практику розрахунків СП на ЕОМ графоаналітична форма представлення методу елементарних відображень виявилася непридатною.

В роботі [30] метод елементарних відображень використаний в аналітичній формі при розрахунку дзеркального параболоїдного відбивача зі сферичним рівнояскравим ДС, центр якого розташований у фокусі параболі. Очевидно, що таке припущення, значно спрощує завдання аналітичного розрахунку оптичної системи СП. Якщо ж світне тіло представити у вигляді циліндра або сукупності циліндрів, орієнтованих певним чином по відношенню до фокуса і оптичної осі відбивача, то даний метод розрахунку є неефективним.

В робіт [31] викладено метод зворотного ходу променів у векторному вигляді, який полягав у розрахунку світлорозподілу дзеркальних відбивачів з протяжними ДС. Простота складання алгоритму розрахунку оптичної системи навіть зі складним світним тілом ДС, висока точність, можливість визначення розподілу освітленості на заданій площині або сили світла, яка направлена в досліджувану точку зробили метод широко використовуваним [32 – 38]. При цьому даним методом не врахований ефект затінення відбивача джерелом світла.

У роботі [39] запропоновано графічний метод розрахунку СП з дзеркальним відбивачем, використовуючи векторне представлення світлових величин. Даний метод дозволяє проводити розрахунки для

осесиметричного дзеркального відбивача СП. Для розрахунку СП використовують теорії світлового поля [40, 83, 84]. При цьому даний метод передбачає припущення, що ДС є точковим та має осесиметричний розподіл сили світла.

У роботах [41, 42] представлено методи для проектування симетричних відбивачів. Припущення про симетричність дозволяють звести задачу до двовимірного випадку, значно спрощуючи, таким чином, обчислення. Якщо ж ми починаємо розглядати загальний випадок для відбивачів, що не володіють осьовою симетрією, то складність обчислень значно зростає. В цьому випадку геометрія відбивача описується системою нелінійних диференціальних рівнянь часткових похідних [43].

На жаль, на даний момент немає відомих аналітичних рішень для рівнянь цього типу. Проте було запропоновано три підходи для вирішення проблеми відбивача в загальному вигляді. В. Олікер вирішує проблему для окремих точок поверхні, що освітлюється за допомогою кінцевого набору еліпсоїдів. При цьому він використовує ітераційний алгоритм [43]. Ries і Muschawesk пропонують нове формулювання завдання, але не приводять чисельного рішення [44]. Parkyn, Ding і Wang використовують, так звані сітки рівно-ступеневого потоку (equi-flux grids). В цьому випадку виходять не гладкі поверхні, а багатогранні [45 – 47].

Ітераційний метод розрахунку відбивача для дискретних точок освітлюваної поверхні і точкового джерела запропонував В. Олікер [43]. Огляд методу дано в [48]. Перевага методу полягає в його гнучкості, так як він не накладає обмежень на форму освітлюваної поверхні, розподіл освітленості по цій поверхні та кутовий розподіл сили світла ДС. Метод використовує властивість еліпсоїдного відбивача, який відбиває світло першого фокуса в другий. Для кожної окремої точки освітлюваної поверхні створюється свій еліпсоїд. Причому всі ці еліпсоїди мають один загальний

фокус, в який поміщається точкове ДС. Другий же фокус еліпсоїдів розміщують в розрахункових точках освітлюваної поверхні. Після визначення фокусів, розраховується фокальний параметр для еліпсоїдів. Даний параметр використовується для визначення значення світлового потоку, що падає на поверхню еліпсоїдного відбивача.

В роботах [49, 50] розроблено методи розрахунку СП із ДС циліндричної форми заданих розмірів. Подальший розвиток цих методів втілюється в методі SMS (Simultaneous Multiple Surface method) [51]. Недоліком даного методу є те, що він не враховує екранування відбитого світлового потоку поверхнею ДС.

Таким чином, існуючі методики розрахунку оптичних систем СП передбачають певні спрощення щодо форми світних тіл джерел світла і не можуть забезпечити необхідну точність розрахунків із ДС заданих геометричних розмірів.

1.3. Моделі та методи розрахунку освітлення вулиць

Проектування установок зовнішнього освітлення вимагає врахування багатьох чинників, а саме: вибір світильника із необхідним світлорозподілом, що забезпечить нормовані кількісні та якісні показники, вибір ефективного та оптимального розташування світильників в ОУ та їх орієнтації, врахування показників енергозбереження та екологічності освітлення.

В даний час для світлотехнічних розрахунків ОУ існує ряд програм, що дозволяють крім основних світлотехнічних характеристик (яскравість, освітленість) також визначати якісні показники освітлення (показник дискомфорту), економічні та енергетичні характеристики освітлювальної установки (вартість обладнання, споживану потужність установки). Практично у кожного великого виробника світлотехнічної продукції є своя

програма розрахунку для власної бази даних: Calculux (Philips), Litestar (SBP), Ulysse (Schreder) [52 – 54]. Існують і універсальні програми для різних баз даних (DIALux) [55].

Недоліком представленого програмного забезпечення для світлотехнічного розрахунку ОУ є використання баз даних, в яких міститься лише власна продукція фірм-виробників, та використання різнотипних форматів, що зумовлює неможливість інтегрування результатів розрахунків в інші програми. На основі аналізу програм світлотехнічного розрахунку проведеного в [56], можна стверджувати, що дані програмні продукти створюються, виходячи з різних схем проектування з різними алгоритмами обчислень. У процесі вирішення специфічних задач виникає необхідність використання того чи іншого програмного забезпечення [57].

Тому задача по розробці математичної моделі для розрахунку основних показників установки зовнішнього освітлення та створення програми, яка б дозволила проводити комплексну оцінку якісних та кількісних показників установок зовнішнього освітлення, є актуальною.

У роботі [57] запропоновано метод розрахунку освітленості за допомогою сукупності інтерполяційних залежностей, що характеризують зміну освітленості на вибраній площині. Даний метод створює передумови для аналізу розподілу освітленості на різних площинах. Проте не дозволяє проводити розрахунок середньої сумарної освітленості. При цьому не висвітлено питання забезпечення точності інтерполяційних формул.

У [58] представлено методику розрахунку нормованих показників зовнішнього освітлення та наведені основні характеристики дорожнього покриття вулиць. Таке визначення нормованих показників зумовлює великий об'єм розрахунків.

У роботі [59] запропонована методика, що дозволяє проводити світлотехнічні розрахунки для вуличного освітлення, проте складні підходи

визначення просторового розподілу освітлення знижують точність розрахунків.

У роботі [60] представлено метод, який базується на визначенні напрямку сили світла світильника до розрахункової точки дорожнього покриття, в якій і визначається горизонтальна освітленість. Недоліком даної методики є відсутність залежності між координатами розрахункової точки та кутами розподілу кривої сили світла в сферичній системі координат.

У роботі [61] були запропоновані залежності, що дозволяють визначати кути φ та θ напрямку сили світла $I_{\varphi\theta}$ від СП в сферичних координатах до розрахункової точки за її координатами та на основі даних залежностей проведено побудову динамічної моделі одностороннього освітлення вулиць і магістралей [62]. Дана модель була розвинута для можливості застосування при різних розташувань СП в ОУ [63]. Недоліком її є відсутність залежностей орієнтації СП від нормованих якісних та кількісних показників ОУ.

Схожі методики розрахунків освітленості поверхні дорожнього покриття розглядалися також в публікаціях [64 – 66].

Загальним недоліком існуючих методик розрахунку ОУ є те, що вони не дозволяють проводити аналіз якісних та кількісних показники для різних категорій вулиць.

1.4. Аналіз впливу температури на світлотехнічні характеристики КЛЛ та СП із КЛЛ

Робота КЛЛ при температурах повітря більших або менших від оптимальної призводить до зниження світлового потоку, зменшення споживаної потужності і світлової віддачі (рис. 1.8).

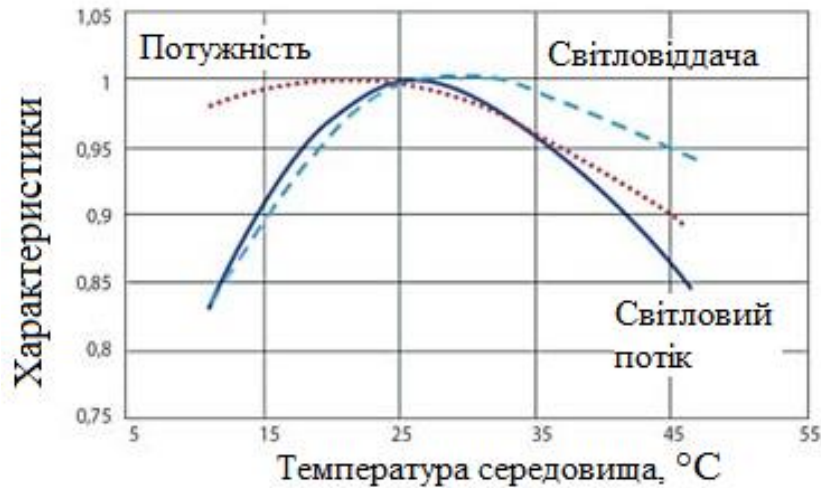


Рис. 1.8. Вплив температури навколишнього середовища на ефективність, потужність і світловий потік КЛЛ [67]

Тепловий режим всередині світильника є основним, що визначає надійність і довговічність його роботи [68]. Гранично допустимі значення робочих температур елементної бази ЕПРА ДС знаходяться в межах 85 – 105 °C, що відповідає граничній температурі навколишнього середовища 50-60 °C. У більшості випадків цей параметр нормується в технічних умовах на КЛЛ і становить 50 °C [69, 70].

Відповідно до [68] максимальна температура зовнішнього середовища дорівнює +30 °C, а максимальна температура всередині світильника з КЛЛ не повинна перевищувати +50 °C. Подальше збільшення температури на кожні 10 °C призводить до зниження терміну служби КЛЛ вдвічі і значного зниження світлового потоку. У зв'язку з цим необхідно точно знати, якої потужності КЛЛ доцільно застосовувати в тому чи іншому світильнику при заміні ЛР чи ДРЛ.

В роботі [71] проведено дослідження температурного режиму різнотипних СП з КЛЛ. Із аналізу результатів встановлено, що внутрішній об'єм світильника мало впливає на його внутрішню температуру через

відсутність переміщення повітря всередині світильника і слабку теплопровідності розсіювача. Тому різні конфігурації розсіювачів світильників були приведені до однотипної теплової моделі.

В роботі [67, 72] проведено аналіз температурних залежностей характеристик КЛЛ потужністю від 55 до 200 Вт. В ході досліджень п'ять зразків компактних люмінесцентних ламп були випробувані в різнотипних світильниках. У цих випробуваннях визначалися температурні умови роботи ламп, при цьому вимірювалися їх потужності і світлові потоки.

Встановлено, що температура колби КЛЛ були найнижчою, коли зразки експлуатувалися на відкритому повітрі. При тестуванні будь-якого зразка КЛЛ у відкритих світильниках температура ламп підвищувалася. Коли випробування проводилися в повністю закритих світильниках, температура ламп підвищувалася ще більше (рис. 1.9).

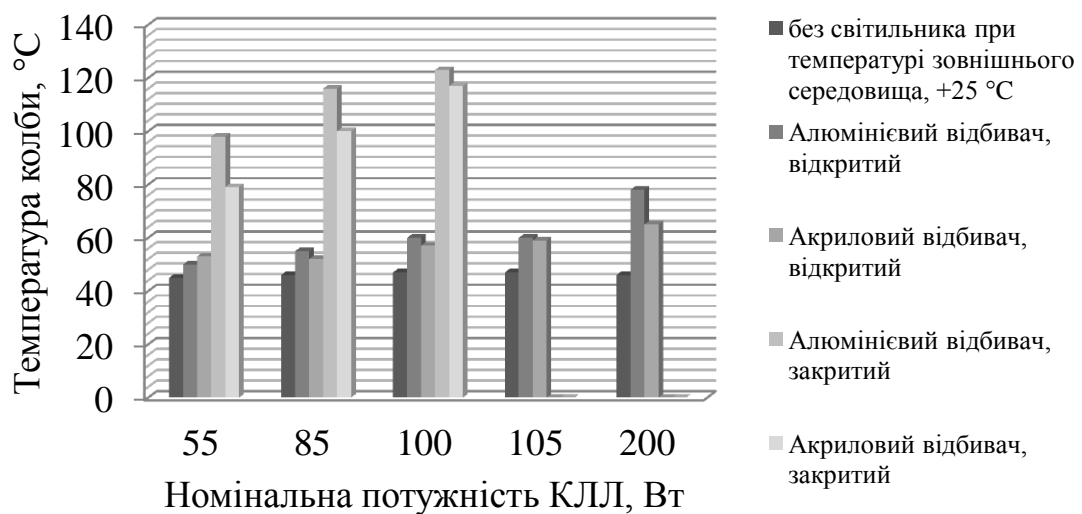


Рис. 1.9. Гістограма температури колби КЛЛ ламп в різних умовах [67]

Випробування КЛЛ показали, що у всіх досліджуваних зразках світловий потік знизився, коли світильник був повністю закритим [73]. Так,

на рис. 1.10 показано зменшення світлового потоку різних зразків КЛЛ через підвищення температури повітря в повністю закритих світильниках.

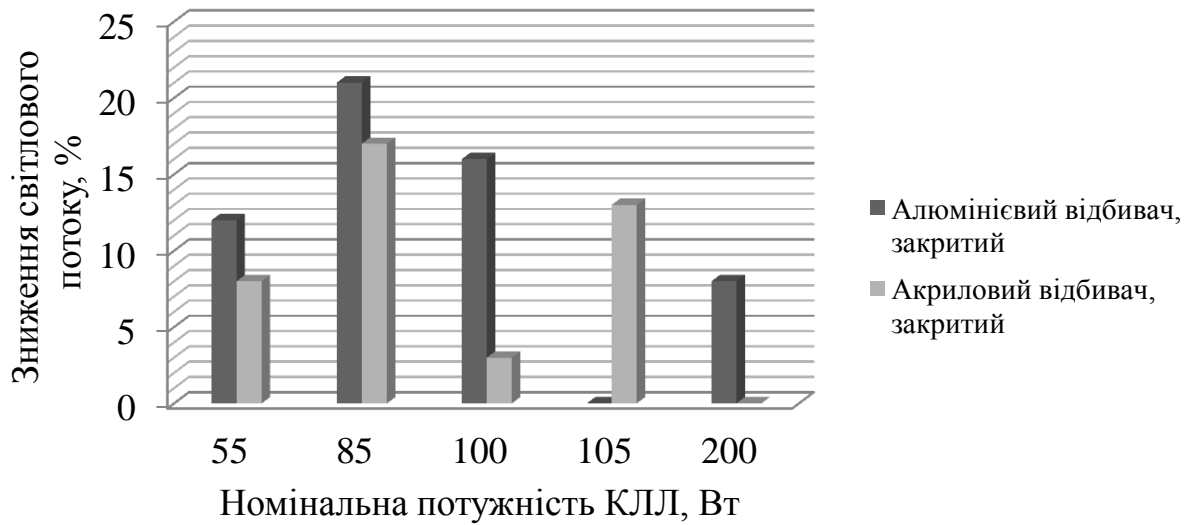


Рис. 1.10. Гістограма зниження світлового потоку КЛЛ при розташуванні їх в закритих світильниках

Як показано на рис. 1.11, робоча потужність КЛЛ змінюється зі зміною температури зовнішнього середовища.

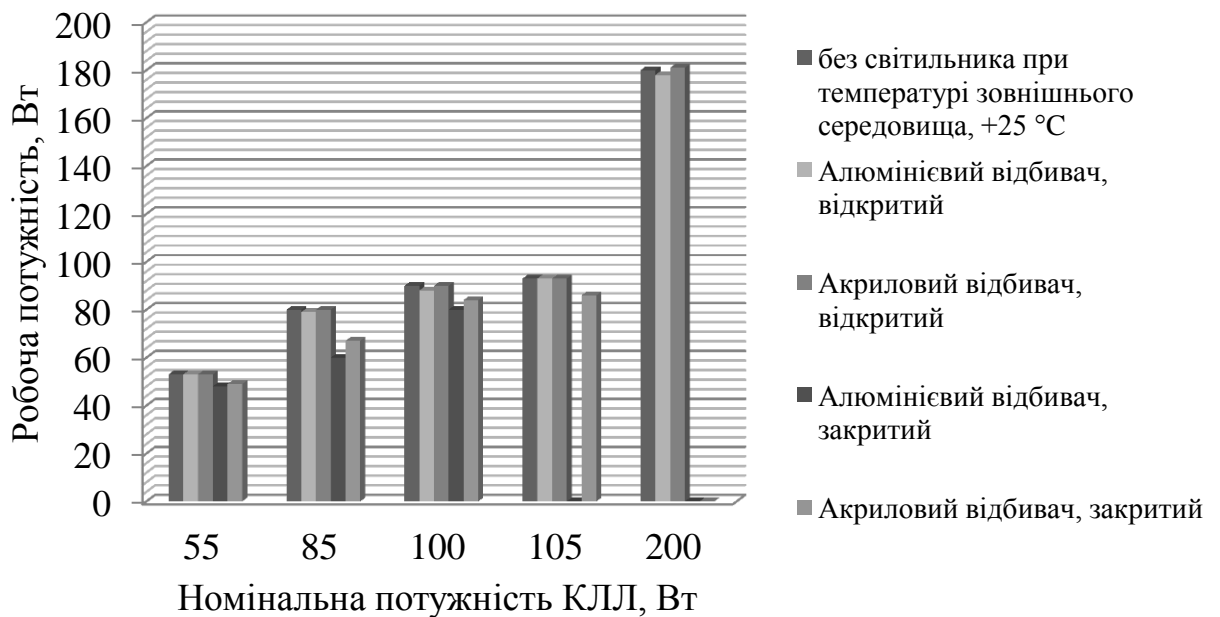


Рис. 1.11. Гістограма потужності КЛЛ в різних робочих умовах

Встановлено, що при зростанням температури при роботі ламп в закритих світильниках потужність КЛЛ знижувалася при випробуваннях на 4,5-14,5 % залежно від типу ламп (рис. 1.12).

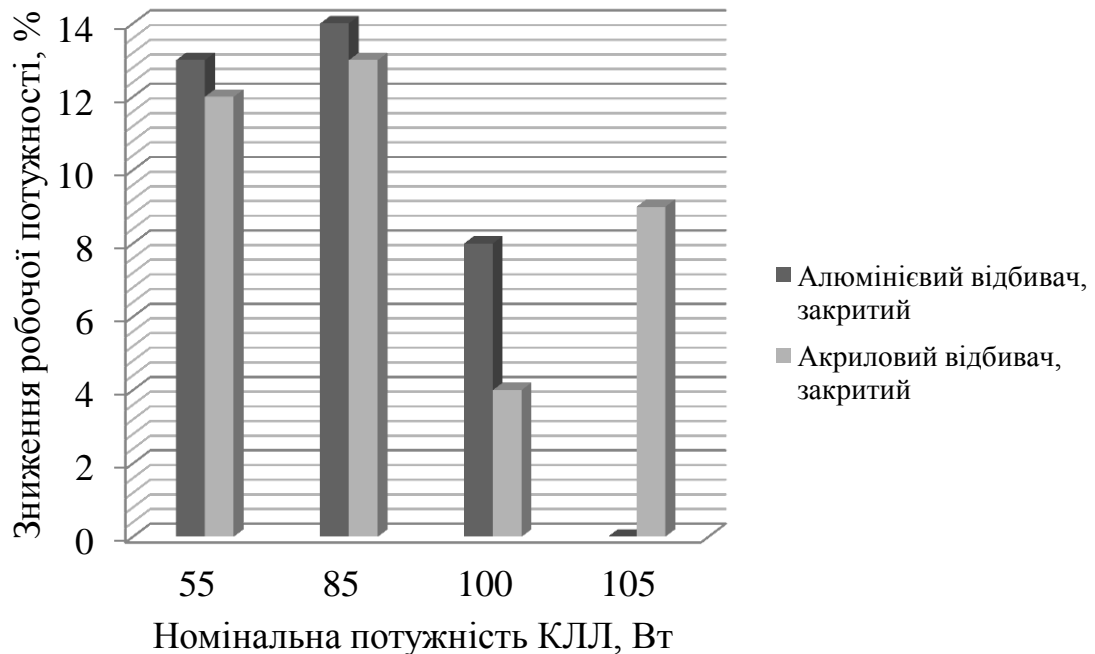


Рис. 1.12. Гістограма зниження потужності КЛЛ в закритих світильниках

Підвищення температури навколишнього середовища може значно вплинути на термін служби ЕПРА [74]. Підвищення температури ЕПРА КЛЛ обумовлено, головним чином, високою потужністю лампи, її орієнтацією і тим, що корпус світильника істотно обмежує конвективне охолодження лампи.

У дослідженнях [67, 72] експлуатаційних характеристик КЛЛ проводилося обмежене тестування типових теплових режимів у відкритих і закритих світильниках. У відкритих світильниках температура коливалася в діапазоні від +27 до +40 °С, що нижче максимальної (граничної) температури, яка допускається виробниками КЛЛ.

При роботі КЛЛ в закритих світильниках виміряна температура не перевищувала граничну температуру 80 °С (рис. 1.13). Таким чином, перед

модернізацією світильників слід перевірити відповідність теплового режиму роботи ламп рекомендованим.

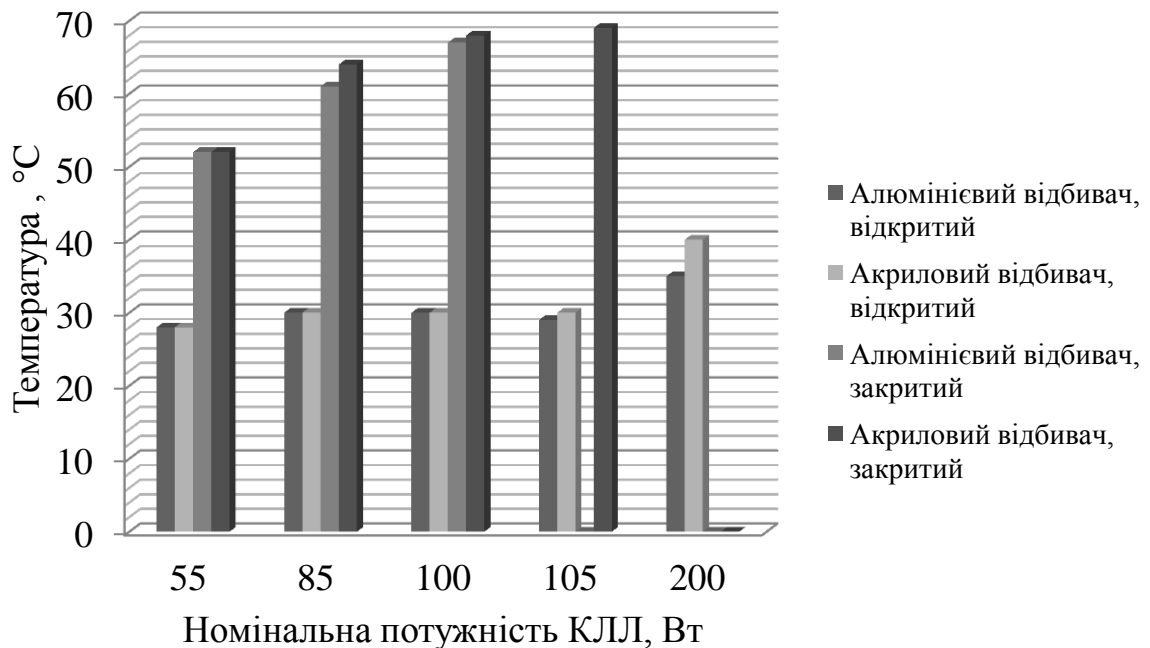


Рис. 1.13. Температура ЕПРА КЛЛ в різних робочих умовах

Деякі потужні компактні люмінесцентні лампи можуть бути занадто великі, щоб поміститися в світильниках. Таким чином, великі розміри деяких типів КЛЛ є певною перешкодою для модернізації світильників. При цьому відбивач, призначений для малих точкових ламп, просторово не розподіляє світло від КЛЛ таким же чином. Із світильника з КЛЛ світло може виходити під іншими кутами, що призводить до зменшення захисного кута.

Використання КЛЛ при модернізації світильників може також привести до деякого зниження рівня освітленості, незважаючи на еквівалентний світловий потік заміненних ламп. Великий розмір КЛЛ вже сам по собі призводить до збільшення поглинання і розсіяння світла в світильнику, знижуючи тим самим його оптичну ефективність. Для оцінки цього ефекту була розрахована оптична ефективність світильника з КЛЛ

потужністю 200 Вт і з МГЛ потужністю 175Вт (рекомендована виробником світильників) [67, 72]. Показано, що в порівнянні з МГЛ, оптична ефективність світильника з КЛЛ була менша на 7...10% .

Із аналізу наведених даних випливає, що при проектуванні СП із КЛЛ необхідно враховувати: температурний режим СП, геометричні розміри світного тіла, світловий розподіл приладу.

1.5. Вплив КЛЛ на показники якості електроенергії та точність засобів її обліку

КЛЛ із ЕПРА є споживачем з нелінійною вольт-амперною характеристикою, що змінює якісні характеристики мережі [75]. Вхідний струм КЛЛ має яскраво виражений імпульсний характер, і значення коефіцієнта спотворення форми струму знаходяться в межах від 82 до 94 % [76]. При цьому, сумарна величина неактивних складових повної потужності коливається в межах від 40 до 50 % від величини активної потужності. Це означає, що фактично КЛЛ споживає значно більшу кількість електроенергії. Це, в свою чергу, зумовлює зниження точності обліку спожитої електроенергії.

В роботі [77] проведено експериментальне визначення похибки вимірювання однофазних індукційних лічильників при зміні напруги живлення в діапазоні $\pm 20\%$ від номінальної та зміні струму від 10 до 300% від номінального при значеннях коефіцієнта потужності 0,8, 0,9 та 1. При цьому виявлено, що вплив коефіцієнта потужності на похибку лічильників однозначно не виражається, але його зростання призводить до зменшення похибки.

В роботі [78] проведено оцінку точності вимірювань споживання електричної енергії світлодіодними джерела світла. В якості приладу обліку електричної енергії вибрано електронний багатотарифний лічильник.

Встановлено, що відносна похибка δ лічильника залежить від відносного вмісту потужностей вищих гармонік.

В роботі [79] проведено дослідження однотипних лічильників в однакових умовах роботи. При випробуваннях в якості вихідного параметра була прийнята похибка вимірювання активної енергії за одиницю часу або потужності споживача. Дослідження проводилося при зміні параметрів:

- коефіцієнт потужності в діапазоні $0,1 \dots 1,0$;
- відхилення напруги – від $-10\% \dots +40\%$;
- коефіцієнт спотворення кривих струму і напруги – $0 \dots 25\%$;
- коефіцієнти гармонійних складових для непарних гармонік – $0 \dots 12\%$;
- коефіцієнти гармонійних складових для парних гармонік – $0 \dots 12\%$;

Результати випробувань лічильників показують істотне зростання похибки вимірювання активної потужності від зниження якості електричної енергії і коефіцієнта потужності.

За дослідженнями, проведеними в [80], при наявності гармонік, починаючи з 17-ї і вище, та значеннях цих гармонік 5-7% і більше, деякі лічильники електричної енергії повністю виходили з ладу, починаючи давати покази, які в кілька разів відрізнялися від дійсних значень вимірюваної електричної енергії. При цьому похибка може досягати значень 10-20% (за даними фірми Fluke до 68% [81]).

В роботі [82] розглянуто проблему достовірності обліку електроенергії при нелінійності навантажень в установках зовнішнього освітлення. Встановлено, що вплив несинусоїдності на сумарну похибку індукційних лічильників найбільшою мірою проявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік. Для покращення обліку електроенергії у системах вуличного освітлення запропоновано встановлювати сучасні електронні коректори коефіцієнта потужності, які суттєво зменшують похибку обліку.

В представлених роботах не проведено дослідження впливу ОУ з СП з КЛЛ на показники якості електричної енергії і відносну похибку її обліку. Це може зумовлювати перевищення відносної похибки обліку електричної енергії та приводити до фіктивного зниження енергетичної ефективності ОУ.

Висновки до розділу:

1. Проведено аналіз стану зовнішнього освітлення по областях України, що дозволило оцінити його енергетичну ефективність та визначити шляхи її підвищення. Узагальнивши дані можна стверджувати, що динаміка впровадження енергозберігаючих джерел світла (4% за рік) в системи зовнішнього освітлення є дуже повільною та в окремих регіонах вона практично відсутня, що викликано недостатнім фінансуванням в цій галузі світлотехніки. Обґрунтовано використання КЛЛ в системах зовнішнього освітлення сільської місцевості та периферійних районів міста.

2. На основі аналізу конструктивних особливостей світлових приладів для зовнішнього освітлення визначено проблеми використання в них КЛЛ, які полягають у дотриманні теплового режиму СП.

3. Розглянуто питання моделювання освітлення дорожнього покриття вулиць, обґрунтовано його важливість, приведено аналіз першоджерел й базових публікацій.

4. Проведено огляд досліджень вплив якості електроенергії на точність її обліку в системах зовнішнього освітлення. Встановлено, що точність показів лічильників електроенергії істотно залежить від якості вимірюваної енергії. При цьому похибка може досягати значень 10-20%

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ З КОМПАКТНИМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИМИ ЛАМПАМИ

2.1. Аналіз світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення із різнотипними джерелами світла

Одним із шляхів розв'язання задачі енергоощадності зовнішнього освітлення є використання в ОУ СП з лампами КЛЛ. У зв'язку з тим, що більшість СП вуличного освітлення були розраховані для ламп типу ДРЛ, ДРІ, ДНаТ, постає проблема дослідження можливості взаємозамінності даних ДС на КЛЛ в існуючих СП [91]. Для аналізу світлотехнічних параметрів використовувались найбільш поширені СП вуличного освітлення ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У (рис. 2.1,а) та ЖКУ, РКУ Helios 21 (рис. 2.1,б) [86]. Вимірювання світлотехнічних параметрів даних СП проводилися із різнотипними ДС – ЛР (150Вт), КЛЛ (55Вт), ДРЛ (80Вт) та ДНаТ (50Вт), які найбільш поширені в зовнішньому освітленні [5–9]. При цьому потужність ДС підбиралася такою, щоб забезпечити необхідний рівень освітлення для категорій доріг групи М3 – М5 [87].



а)



б)

Рис. 2.1. Зовнішній вигляд світлових приладів а) ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У; б) ЖКУ, РКУ Helios 21

Вимірювання характеристик світлорозподілу проводилися на розподільчому фотометрі, схема якого зображена на рис. 2.2. Суть методу

полягає у покроковій фіксації значень сили світла від СП при його повороті на заданий кут [88].

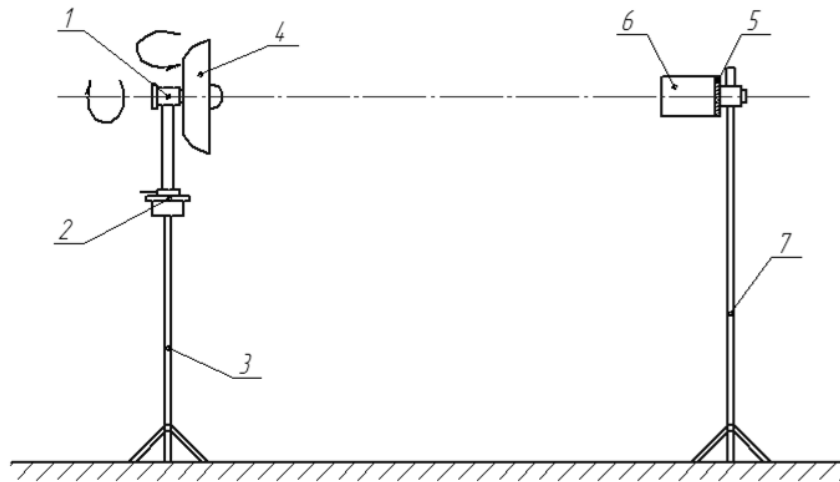
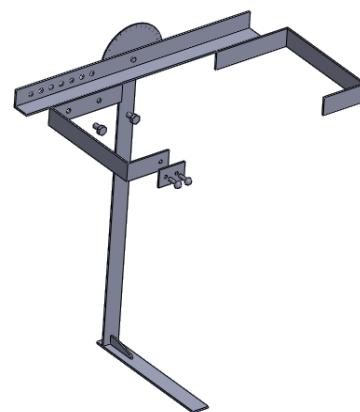


Рис. 2.2. Схема розподільчого фотометра: 1 – вузол кріплення приладу, 2 – поворотний пристрій, 3 – стійка фотометра, 4 – досліджуваний світловий прилад, 5 – приймач (фотоприймач ФЕС–10), 6 – кожух з діафрагмою, 7 – стійка приймача

Для даного фотометра було розроблено та виготовлено універсальний вузол кріплення, який використовувався для даного типу СП (рис. 2.3). Прилад дозволяв змінювати кут φ у горизонтальній площині від 0° до 180° та кут θ у вертикальній площині від -90° до 90° .



а)



б)

Рис. 2.3. Вузол кріплення світлових приладів: а) розміщення СП на розподільчому фотометрі; б) 3D модель

Вимірювання сили світла $I_{\varphi\theta}$ здійснювалося за допомогою головки з фотоприймачем ФЕС–10 при покроковій зміні кутів φ та θ на 5° . Світловий розподіл досліджуваного СП представлявся у вигляді фотометричного тіла (рис. 2.4), для побудови якого була розроблена програма в середовищі MatLab.

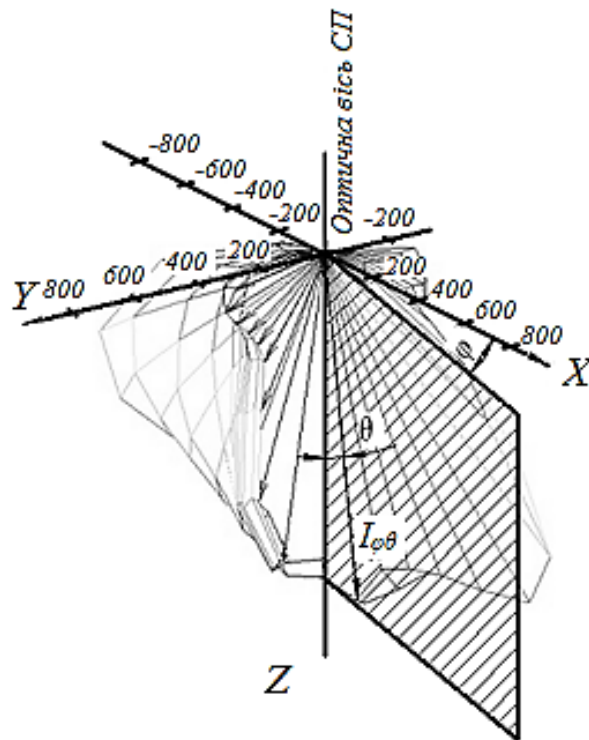


Рис. 2.4. Фотометричне тіло СП

Алгоритм програми побудови фотометричного тіла СП за експериментальними даними включає в себе наступні етапи:

- 1) створення масиву даних значень сили світла $I_{\varphi\theta}$, для кутів φ та θ , які отримувалися в результаті експериментальних вимірювань на розподільчому фотометрі;
- 2) перетворення сферичних координат $I_{\varphi\theta}$, φ та θ за допомогою оператора SPH2CART в координати декартової системи X, Y, Z ;
- 3) інтерполяція масивів даних X, Y, Z за допомогою оператора INTERP2;
- 4) побудова фотометричного тіла.

За отриманими результатами побудовано фотометричні тіла кожного із СП, які наведені на рис. 2.5 та рис. 2.6.

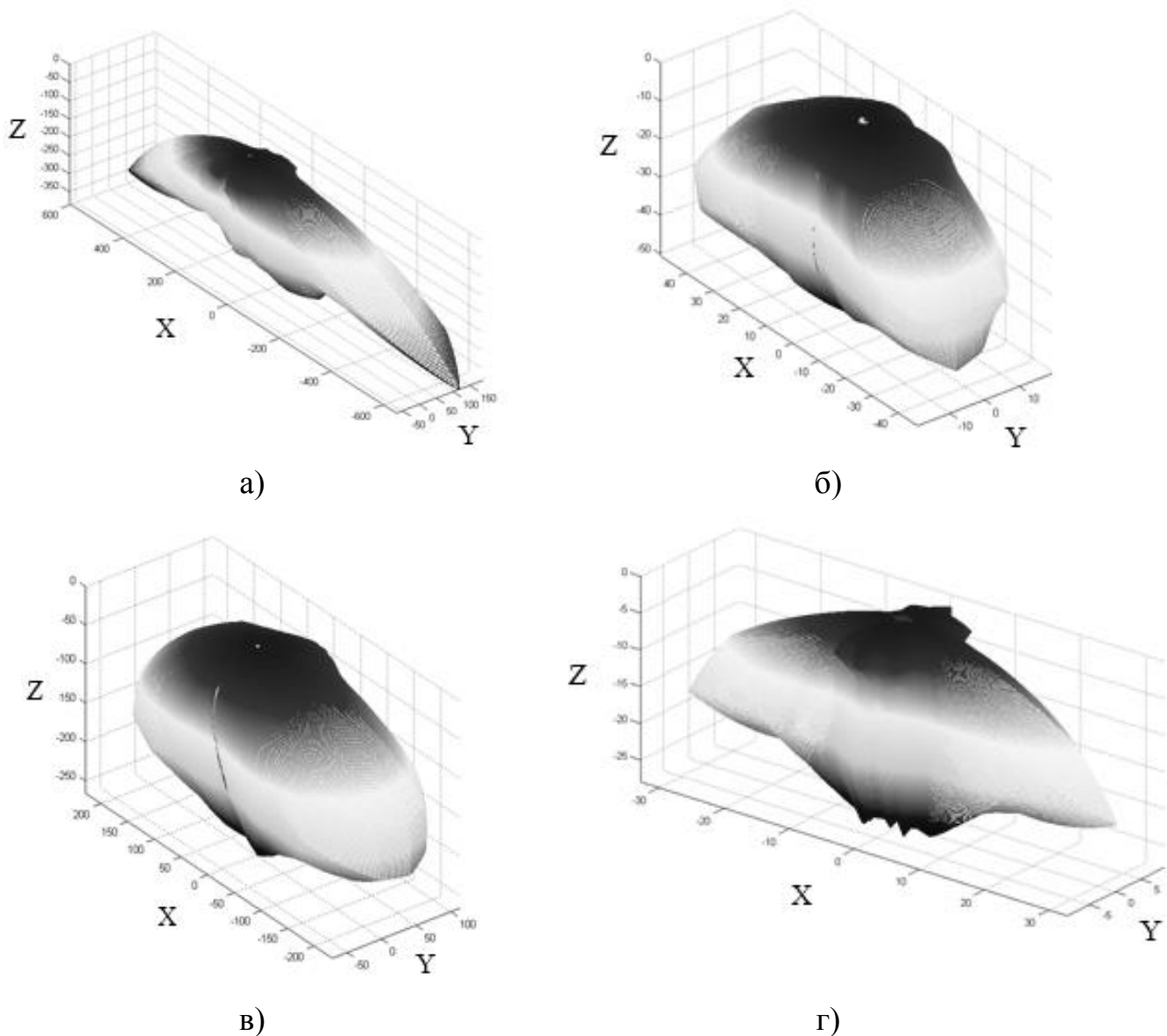


Рис. 2.5. Світлорозподіл світильника ЖКУ, РКУ Helios 21 з лампами: а) ДНаТ; б) ДРЛ; в) КЛЛ; г) ЛР

Як бачимо із фотометричних тіл, представлених на рис. 2.5,а та рис. 2.5,г, світловий прилад ЖКУ, РКУ Helios 21 з лампами ДНаТ та ЛР має широкий світлорозподіл в поперечній площині та концентрований в повздовжній площині. При використанні даного світлового приладу із лампами ДРЛ та КЛЛ світлорозподіл (рис. 2.5,б, рис. 2.5,в) залишається

концентрованим в повздовжній площині, але в поперечній площині він змінюється на півширокий.

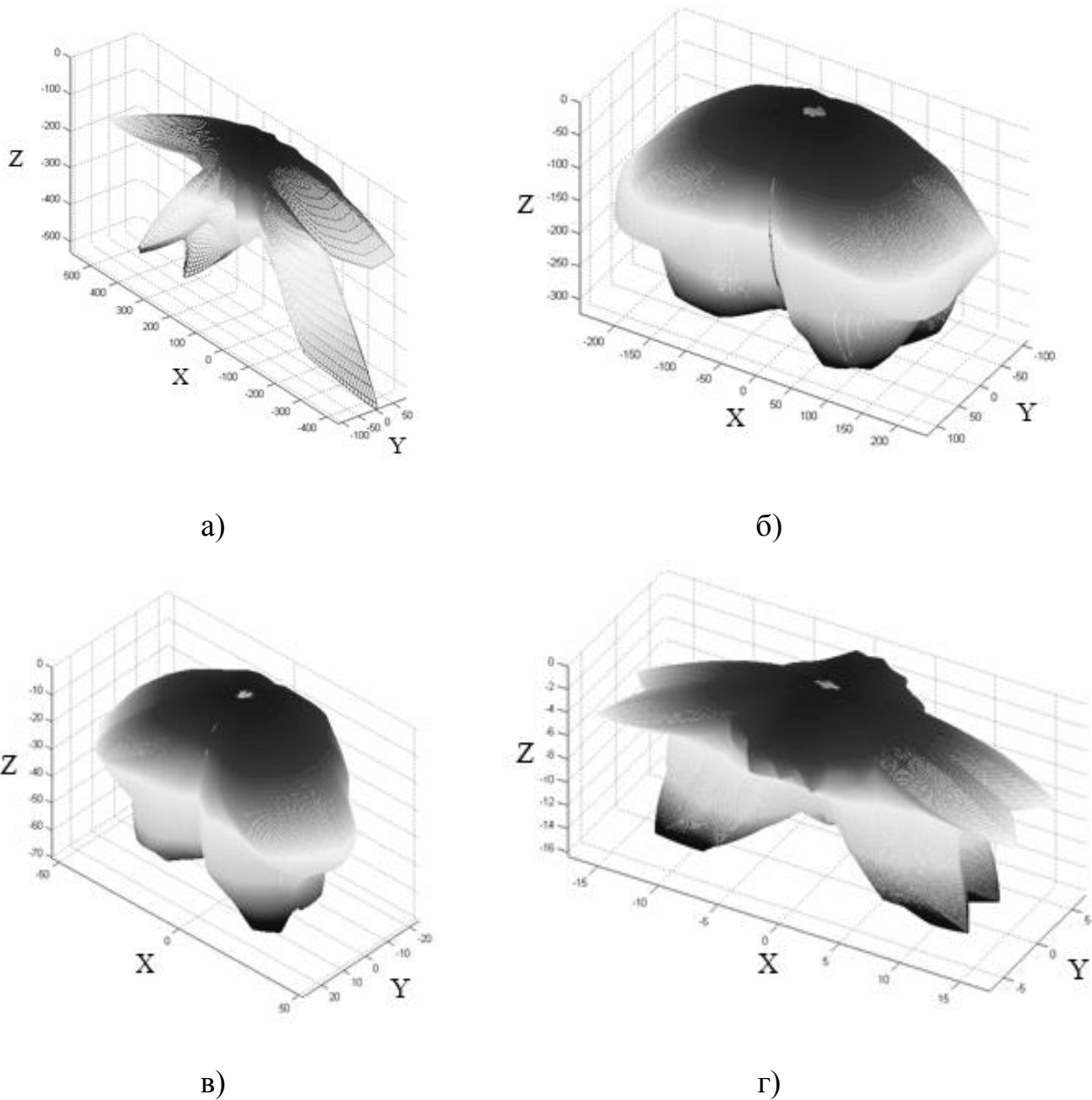


Рис. 2.6. Світлорозподіл світильника ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У з лампами: а) ДНаТ; б) ДРЛ; в) КЛЛ; г) ЛР

Фотометричні тіла світлових приладів ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У із лампами ДНаТ та ЛР, представленні на рис. 2.6,а та 2.6,г, мають доволі складну форму, але можна стверджувати, що в повздовжній площині

світлорозподіл є широким (коефіцієнт форми $K_{\phi} = 1,93$) та півшироким ($K_{\phi} = 1,69$), відповідно. В поперечній площині світлорозподіл є концентрованим. При використанні в даному СП ламп ДРЛ та КЛЛ (рис. 2.6,б, рис.2.6,в) світловий розподіл в повздовжній площині близький до косинусного, а в поперечній – до глибокого.

Встановлено, що безпосередня заміна джерел світла із різною формою світлого тіла в світлових приладах призводить до зміни характеристик світлорозподілу. Цей параметр значною мірою визначає ефективність системи освітлення в цілому. При використанні СП з вдало підібраними кривими сили світла можна досягти економії електроенергії до 30% [59].

Для визначення ККД досліджуваних світлових приладів було проведено вимірювання світлового потоку $\Phi_{ДС}$ кожного із джерел світла в фотометричній кулі (табл. 2.1) [89].

Таблиця 2.1

Вхідні данні для розрахунку

Тип лампи	Потужність P_L , Вт	Світловий потік $\Phi_{ДС}$, лм	Світлова віддача $H_{ДС}$, лм/Вт
ЛР	150	2180	14,5
ДРЛ	80	3800	47,5
ДНаТ	50	3700	74
КЛЛ	55	3600	65,5

Розрахунок вихідного світлового потоку СП $\Phi_{СП}$ проводився з використанням експериментальних даних $I_{\phi\theta}$, ϕ та θ в середовищі програми MatLab згідно з формулою [59]:

$$\Phi_{СП} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I_{\varphi\theta} \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (2.1)$$

Коефіцієнт корисної дії $\eta_{СП}$ та світлову віддачу $H_{СП}$ світлового приладу визначали за формулами:

$$\eta_{СП} = \frac{\Phi_{СП}}{\Phi_{ДС}}, \quad (2.2)$$

$$H_{СП} = H_{ДС} \eta_{СП}, \quad (2.3)$$

де $H_{ДС}$ – світлова віддача ДС згідно з табл. 2.1.

Отримані результати наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Значення ККД та світлової віддачі світлових приладів
із різними джерелами світла

Тип світильника	Тип джерела світла	Коефіцієнт корисної дії СП $\eta_{СП}$	Світлова віддача СП $H_{СП}$, лм/Вт
ЖКУ, РКУ Helios 21	ДНаТ	0,707	52,3
	ДРЛ	0,675	32,1
	КЛЛ	0,532	34,8
	ЛР	0,765	12,5
ГКУ-, ЖКУ, РКУ11У	ДНаТ	0,623	46,1
	ДРЛ	0,719	38,9
	КЛЛ	0,619	40,5
	ЛР	0,504	7,3

Встановлено, що при використанні у світлових приладах ЖКУ, РКУ Helios 21 компактних люмінесцентних ламп їх ККД знижується на 14..17 %. Якщо в даних світлових приладах використати лампу розжарювання, то коефіцієнт корисної дії світильника зросте на 0,765, але світлова віддача СП зменшується на 39,2 % у порівнянні із КЛЛ через низьку енергетичну ефективність даних джерел світла. Тому навіть при такому високому значенні $\eta_{СП}$ з лампою розжарювання використовувати їх неефективно.

У світлових приладах ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У найвищий коефіцієнт корисної дії із лампою типу ДРЛ – 0,719. Практично однакові значення $\eta_{СП}$ із лампами ДНаТ і КЛЛ – 0,623 та 0,619. Найнижчий $\eta_{СП}$ із лампою розжарювання – 0,504. Очевидно, що даний світловий прилад розрахований для ДС із об’ємним світним тілом. Якщо ж встановити в цей СП точкове або лінійне джерело світла (ЛР чи ДНаТ), то внаслідок того, що положення їх світного тіла не попадає в оптичний центр відбивача світлового приладу, значення $\eta_{СП}$ буде низьким.

2.2. Моделювання світлового поля КЛЛ

Для характеристики світлового поля було використано світловий вектор. Світловий вектор $\vec{\epsilon}$ визначає в будь-якій точці поля модуль і напрямок вектора переносу світлової енергії за одиницю часу через одиницю площі, яка перпендикулярна напрямку поширення світлового потоку [90].

Потік світлового вектора через елементарну ділянку dA визначається скалярним добутком світлового вектора $\vec{\epsilon}$ на вектор поверхні $d\vec{A}$ (рис. 2.7):

$$dF = \vec{\epsilon} d\vec{A} = |\vec{\epsilon}| \cos(\alpha) dA = \epsilon_N dA, \quad (2.4)$$

де dF – потік світлового вектора через елементарну ділянку dA ;

ε_N – проекція світлового вектора на нормаль до ділянки dA ;

α – кут між напрямком світлового вектора $\vec{\varepsilon}$ і нормаллю до елементарної ділянки dA .

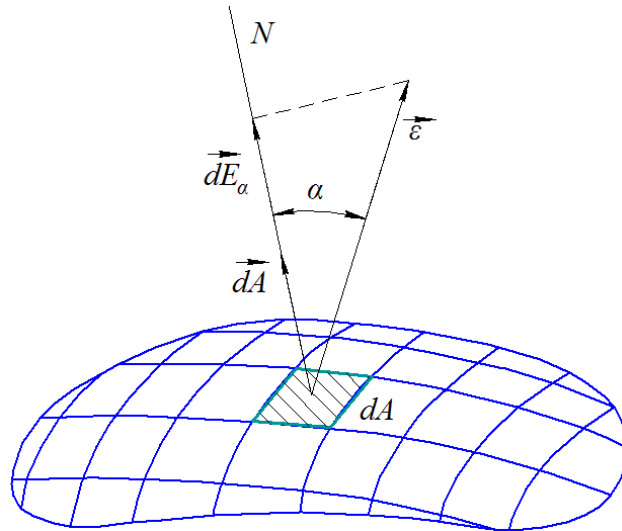


Рис. 2.7. Потік світлового вектора через елементарну ділянку dA

Приймаючи напрямок вектора $d\vec{A}$ по зовнішній нормалі до досліджуваної поверхні, отримаємо кут $\alpha < \pi/2$ для всіх потоків випромінювання, що направленні на внутрішню сторону елемента поверхні dA . Відповідно, добуток $\varepsilon_N dA$ буде додатній для всіх потоків, що пронизують поверхню з внутрішньої сторони. Для всього випромінювання, що падає на зовнішню сторону поверхні dA , добуток $\varepsilon_N dA$ буде від'ємним, так як $\alpha > \pi/2$. Даний аналіз показує, що скалярний добуток світлового вектора на вектор елементарної ділянки чисельно дорівнює різниці світлових потоків, що падають на елементарну ділянку поверхні з внутрішньої та зовнішньої сторін:

$$d\Phi_\alpha - d\Phi_{\pi-\alpha} = \vec{\varepsilon} d\vec{A} = \varepsilon_N dA = \varepsilon \cos(\alpha) dA, \quad (2.5)$$

де $d\Phi_\alpha$ та $d\Phi_{\pi-\alpha}$ – світлові потоки, що падають на обидві сторони елементарної ділянки dA .

Таким чином з аналізу рівнянь (2.4) та (2.5) випливає:

– потік світлового вектора $\vec{\varepsilon}$ через будь-яку поверхню чисельно дорівнює різниці світлових потоків, що падають на одну і другу сторону цієї поверхні

$$F = \Phi_\alpha - \Phi_{\pi-\alpha} = \int_A \vec{\varepsilon} d\vec{A} = \int_A \varepsilon_N dA, \quad (2.6)$$

– проекція світлового вектора на нормаль до елементарної ділянки dA визначається різницею освітленості двох сторін елементарної ділянки

$$\varepsilon_N = \varepsilon \cos(\alpha) = E_\alpha - E_{\pi-\alpha} = \Delta E_\alpha, \quad (2.7)$$

– максимальна різниця значень освітленості двох сторін елементарної ділянки dA в досліджуваній точці поля дорівнює модулю світлового вектора:

$$\varepsilon = |\vec{\varepsilon}| = \Delta E_{\max}. \quad (2.8)$$

Із другого пункту слідує, що при розташуванні всіх джерел випромінювання по одну сторону освітлювальної поверхні проекція світлового вектора на нормаль до елементарної ділянки цієї поверхні дорівнює її освітленості.

Модуль світлового вектора в досліджуваній точці поля, що створюється елементарним випромінювачем, дорівнює максимальній освітленості, а напрямок вектора визначає напрямок випромінювання в досліджувану точку поля:

$$d\vec{\varepsilon} = \vec{l}_{\alpha\beta}^0 dE_N = L_{\alpha\beta} d\vec{\Omega}, \quad (2.9)$$

де $\vec{l}_{\alpha\beta}^0$ – одиничний вектор напрямку випромінювання;

$L_{\alpha\beta}$ – яскравість випромінювача в досліджуваному напрямку;

$d\vec{\Omega}$ – вектор тілесного кута $d\Omega$, в межах якого зосереджена елементарна випромінююча ділянка, що створює світлове поле.

Модуль вектора елементарного тілесного кута $d\vec{\Omega}$ чисельно дорівнює тілесному $d\Omega$, а напрямок вектора співпадає з віссю елементарного тілесного кута (рис. 2.8) [93]:

$$d\vec{\Omega} = \vec{l}_{\alpha\beta}^0 \frac{dA}{l^2} \cos(\alpha), \quad (2.10)$$

де α – кут між напрямком нормалі N до елемента dA і вектором $d\vec{\Omega}$.

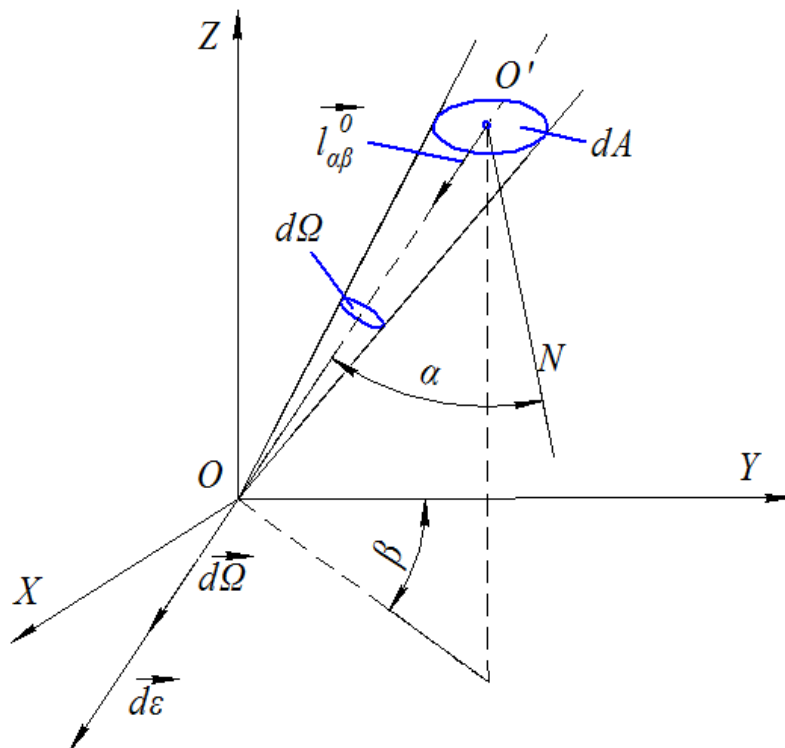


Рис. 2.8. Вектор елементарного тілесного кута $d\vec{\Omega}$

При цьому напрямок вектора $d\vec{\Omega}$ орієнтований по напрямку випромінювання.

Вектор тілесного кута, що опирається на випромінювач скінчених розмірів A , визначається інтегруванням рівняння (2.10) по поверхні випромінювача:

$$\vec{\Omega} = \int_A \vec{l}_{\alpha\beta}^0 \frac{\cos(\alpha)}{l^2} dA = \int_A \frac{\cos(\alpha)}{l^3} (x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}) dA, \quad (2.11)$$

де $\vec{l}_{\alpha\beta}^0 = \frac{1}{l}(x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k})$, x , y та z – координати точки поверхні випромінювача.

Для визначення світлового вектора необхідно задати форму поверхні випромінювача, в даному випадку форму колби КЛЛ. Найбільш поширені лампи із спіралеподібною (рис. 2.9,а) та U-подібною формою з різною кількістю розрядних каналів (4-канальні (рис. 2.9,б) та 6-канальні (рис. 2.9,в)). Число паралельних каналів розрядної трубки КЛЛ обмежене конструкційними і технологічними можливостями: підвищення кількості каналів понад 8 при діаметрі трубок 12–17мм викликає неприпустиме збільшення поперечного розміру лампи в прицокольній зоні.



а)



б)



в)

Рис. 2.9. Зразки КЛЛ: а) із спіралеподібною формою світного тіла; із U-подібною формою світного тіла б) 4-канальні; в) 6-канальні

Для розрахунку параметрів світлового поля розрядні канали лампи були представленні у вигляді двох спіралеподібних рівнояскравих трубок (рис. 2.10), які описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} x = (R + r \cos(v)) \sin(u), \\ y = (R + r \cos(v)) \cos(u), \\ z = r \sin(v) + 2u, \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} x = (R + r \cos(v)) \sin(u), \\ y = (R + r \cos(v)) \cos(u), \\ z = r \sin(v) + 2u - 2\pi, \end{cases} \quad (2.13)$$

де R – радіус колби лампи;

r – радіус спіральної трубки.

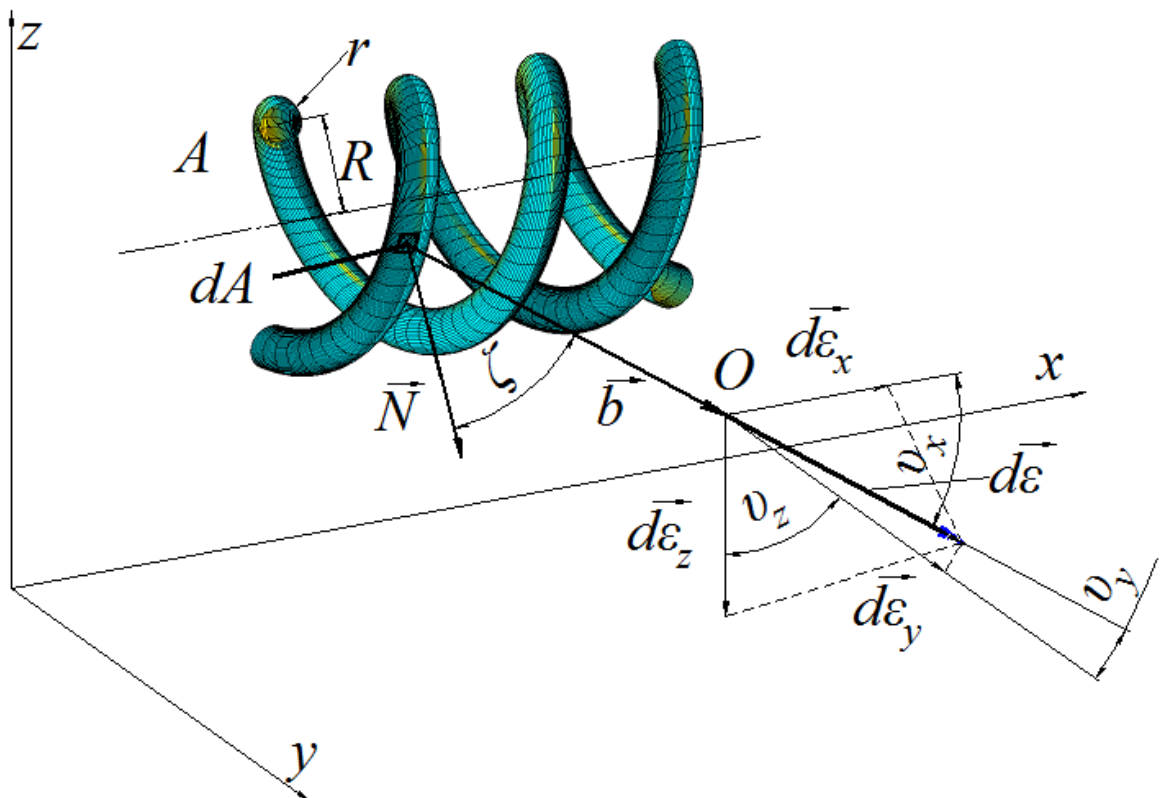


Рис. 2.10. Визначення світлового вектора від КЛЛ із спіралеподібною формою світного тіла

Елементарний світловий вектор $d\vec{\varepsilon}$, що створюється елементарною випромінюючою ділянкою dA випромінювача A в деякій точці O , виражали через його ортогональні проекції. Тоді рівняння для розрахунку цих проекцій світлового вектора матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}d\varepsilon_x &= dE_N \cos(\vartheta_x), \\d\varepsilon_y &= dE_N \cos(\vartheta_y), \\d\varepsilon_z &= dE_N \cos(\vartheta_z),\end{aligned}\tag{2.14}$$

де $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ – направляючі кути між \vec{b} та відповідними осями координат.

Оскільки

$$dE_N = \frac{L \cos(\zeta)}{|\vec{b}|^2} dA,\tag{2.15}$$

то рівняння для ортогональних проекцій елементарного світлового вектора $d\vec{\varepsilon}$ будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}d\varepsilon_x &= \frac{L \cos(\zeta)}{|\vec{b}|^2} \cos(\vartheta_x) dA, \\d\varepsilon_y &= \frac{L \cos(\zeta)}{|\vec{b}|^2} \cos(\vartheta_y) dA, \\d\varepsilon_z &= \frac{L \cos(\zeta)}{|\vec{b}|^2} \cos(\vartheta_z) dA,\end{aligned}\tag{2.16}$$

де ζ – кут між головною нормаллю \vec{N} до елемента випромінювача dA та вектором \vec{b} , направленим від цього елемента до досліджуваної точки світлового поля O ;

L – яскравість випромінювача dA .

Світловий вектор, що створюється випромінювачем, визначався шляхом інтегрування по поверхні випромінювача A

$$\vec{\varepsilon} = \int_A d\vec{\varepsilon} = \int_A (d\varepsilon_x \vec{i} + d\varepsilon_y \vec{j} + d\varepsilon_z \vec{k}). \quad (2.17)$$

Ортогональні проекції світлового вектора дорівнюють:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_x)}{|\vec{b}|^2} dA, \\ \varepsilon_y &= L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_y)}{|\vec{b}|^2} dA, \\ \varepsilon_z &= L \int_A \frac{\cos(\zeta) \cos(\vartheta_z)}{|\vec{b}|^2} dA. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Рівняння (2.18) визначають ортогональні проекції світлового вектора від всієї поверхні A випромінювача в досліджуваній точці. В реальних умовах освітленість буде створюватися тільки випромінюванням видимої частини поверхні A . Тому для підвищення точності результатів розрахунку світлового поля було враховано особливості геометрії та форми світлого тіла даного випромінювача.

Прийнявши \vec{N} по зовнішній поверхні випромінювача, кут ζ для елементарного випромінювача dA , який видно із точки O , буде змінюватися

в проміжку $0 \leq \zeta \leq \pi/2$, а для елементарного випромінювача, якого не видно із досліджуваної точки – в проміжку $\pi/2 < \zeta \leq \pi$.

При цьому така складана форма світного тіла зумовлює багаторазові відбиття світла між каналами випромінювача [94]. Тому додатково необхідно враховувати даний чинник при розрахунку світлового вектора. Для цього розглянемо дві випромінюючі поверхні A_1 та A_2 . Вони розташовані таким чином, що із досліджуваної точки O видно тільки частину поверхні A_1 внаслідок перекривання поверхнею A_2 (рис. 2.11).

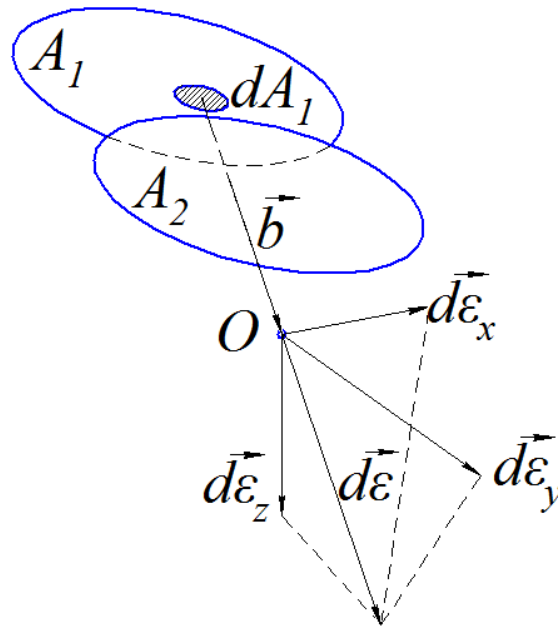


Рис. 2.11. Вплив геометричних розмірів світного тіла на розрахунок світлового вектора $\vec{\varepsilon}$

Із рис. 2.11 випливає умова – якщо вектор \vec{b} попадає на поверхню світного тіла A_2 , то ділянка dA_1 не буде впливати на світловий вектор $d\vec{\varepsilon}$ в точці O .

Врахування даних умов дозволило підвищити точність отриманих результатів моделювання світлового поля КЛЛ на 40–60% в залежності від геометричних розмірів світного тіла.

2.3. Світлотехнічний розрахунок дзеркального відбивача СП із заданими розмірами джерела світла

Для визначення форми дзеркального відбивача СП необхідно мати таке рівняння $r(\gamma)$, яке давало б залежність радіусів-векторів r деякої точки M від кута γ , який визначає напрямок падаючого променя, і кута α , що визначає напрямок відбитого променя (рис. 2.12) [18].

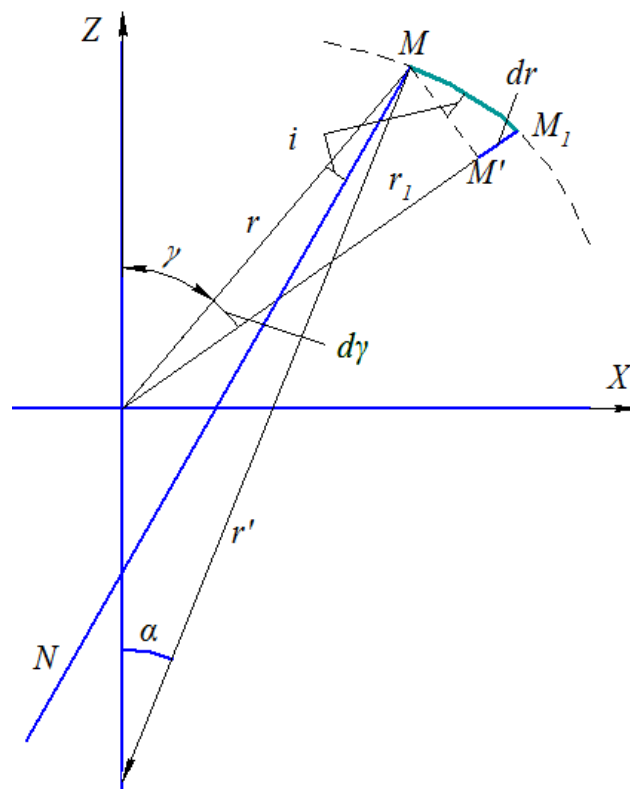


Рис. 2.12. Визначення профільної кривої відбивача

Задаючи певний початковий радіус вектор r_j поверхні відбивача можна розрахувати наступний радіус вектор r_{j+1} при відомій функції необхідного ходу променів $\alpha(\gamma)$, що характеризує залежності між падаючим світловим потоком на внутрішню поверхню відбивача і світловим потоком відбитим від неї.

Для визначення функції необхідного ходу променів $\alpha(\gamma)$ спочатку задавалися світлорозподіли СП $I(\alpha)$ та ДС $I(\gamma)$, які будувалися на одному графіку, як показано на рис. 2.13.

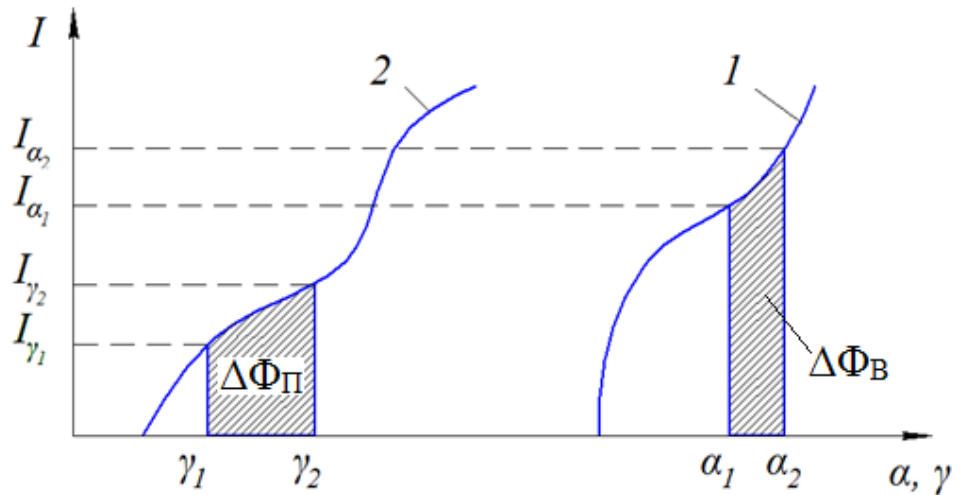


Рис. 2.13. Визначення функції необхідного ходу променів:
(1) – світлорозподіл СП $I(\alpha)$, (2) – світлорозподіл ДС $I(\gamma)$

Зв'язок між кутами α та γ визначали згідно рівняння балансу падаючого світлового потоку $\Delta\Phi_{\Pi}$ на внутрішню поверхню відбивача, який зосереджений в проміжку між кутами γ_1 та γ_2 , і відбитого світлового потоку $\Delta\Phi_{\text{В}}$, який зосереджений в проміжку між кутами α_1 та α_2 :

$$\Delta\Phi_{\Pi} = \rho\Delta\Phi_{\text{В}}, \quad (2.19)$$

де ρ – коефіцієнт відбивання поверхні відбивача.

Очевидно, що

$$\Delta\Phi_{\Pi} = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} I(\gamma) d\gamma, \quad (2.20)$$

$$\Delta\Phi_{\text{В}} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\alpha) d\alpha. \quad (2.21)$$

Тоді

$$\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} I(\gamma) d\gamma = \rho \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\alpha) d\alpha \quad (2.22)$$

Після спрощення рівняння (2.22) має вигляд:

$$J(\gamma_2) - J(\gamma_1) = \rho(J(\alpha_2) - J(\alpha_1)), \quad (2.23)$$

де $J(\gamma)$ та $J(\alpha)$ – первісні від функцій $I(\gamma)$ та $I(\alpha)$, відповідно.

Знаючи початкове значення кута γ_1 та вибравши приріст $\Delta\gamma$ можна визначити кут γ_2 :

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \Delta\gamma. \quad (2.24)$$

Кут α_1 вибирався в залежності від схеми ходу падаючих і відбитих променів (рис. 2.14). Розрахунок кута α_2 проводиться згідно рівняння (2.23).

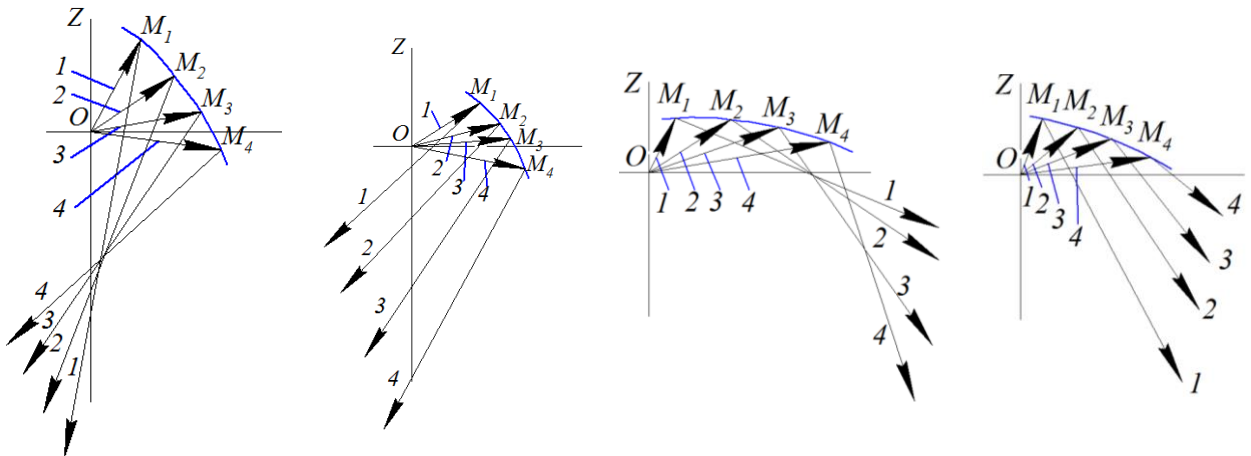


Рис. 2.14. Схеми ходу падаючих та відбитих променів

Таку операцію було проведено для кутів $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ та розраховано значення кутів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$. Після апроксимації отриманого масиву значень кутів α та γ визначали функцію необхідного

ходу променів $\alpha(\gamma)$. Функцію $r(\gamma)$ визначали, проінтегрувавши рівняння [18]:

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg}(i) d\gamma, \quad (2.25)$$

де $i = \gamma - \alpha/2$ – кут падіння променя в точку M (див. рис. 2.12).

Вище представленні розрахунки проведено із припущенням, що джерело світла має точкові розміри. Безпосередня заміна точкового джерела світла на джерело світла із заданими геометричними розмірами світного тіла призведе до екранування світним тілом частини відбитого світлового потоку, що в свою чергу знижує ККД світлового приладу. Тому, щоб розрахувати таку форму відбивача, яка б направляла світло повз поверхню світного тіла у заданому напрямку, необхідно спочатку визначити критичну ділянку, яка спрямовує світловий потік на світне тіло [92].

Для цього задамо поверхню світного тіла A_2 , яка описується функцією $f_2(x, y, z)$ і має яскравість L . Розглянемо елементарну ділянку dA_1 відбиваючої поверхні A_1 (рис. 2.15). Світловий потік, що падає на цю елементарну ділянку від поверхні A_2 , буде дорівнювати

$$d\Phi_1 = \vec{\varepsilon} d\vec{A}_1, \quad (2.26)$$

де $\vec{\varepsilon}$ – світловий вектор, що створюється випромінюючою поверхнею A_2 на елементарній ділянці dA_1 ;

$d\vec{A}_1$ – вектор, направлений вздовж одиночного вектора нормалі \vec{n} до dA_1 і має абсолютне значення $|d\vec{A}_1| = dA_1$.

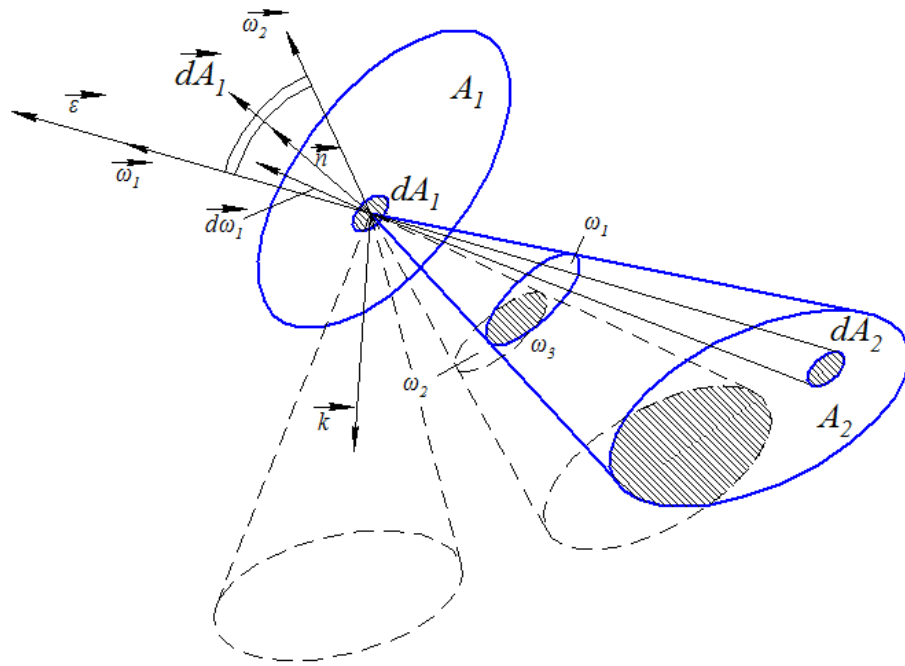


Рис. 2.15. Геометрична модель системи «світне тіло – відбивач»

При цьому

$$\vec{\varepsilon} = \int_{\omega_1} L d\vec{\omega}_1, \quad (2.27)$$

де $d\vec{\omega}_1$ – вектор елементарного тілесного кута $d\omega_1$, в межах якого зосереджена елементарна випромінююча поверхня dA_2 .

Очевидно, що світловий потік, який екранується поверхнею випромінювача, зосереджений в тілесному куті ω_3 , що утворений перетином тілесних кутів ω_1 та ω_2 і визначається за формулою

$$d\Phi_3 = L\vec{\omega}_3 d\vec{A}_1. \quad (2.28)$$

Із рис. 2.15 випливає умова, що коли вектор $(-\vec{n})$ направлений на поверхню світлого тіла A_2 , то тілесні кути ω_1 та ω_2 будуть перетинатися, а отже, світловий потік Φ_1 , що падає на елементарну ділянку dA_1 від

випромінюючої поверхні A_2 , після відбивання частково або повністю попаде на цю поверхню. Дана умова дозволяє визначити множину всіх елементарних ділянок, що утворюють критичну ділянку відбивача.

Щоб уникнути попадання світлового потоку, відбитого від відбивача СП на ДС, проведено розрахунок зміни форми критичної ділянки. Рівняння поверхні цієї ділянки відбивача зміненої форми має вигляд [95]:

$$f(x, y, z) = \int_{x_0}^{x_k} W(x, y, z) dx + \int_{y_0}^{y_k} M(x_0, y, z) dy + \int_{z_0}^{z_k} R(x_0, y_0, z) dz, \quad (2.29)$$

$$\text{де } W = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{K_{x_i} + P_{x_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}}, M = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{K_{y_i} + P_{y_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}}, R = \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{K_{z_i} + P_{z_i}}{\sqrt{2 - 2 \cos \psi}};$$

$P_{x_i}, P_{y_i}, P_{z_i}$ – координати вектора $\vec{\omega}_1$ тілесного кута ω_1 (тілесний кут, в якому зосереджений падаючий світловий потік $d\Phi_1$ (рис.2.16));

$K_{x_i}, K_{y_i}, K_{z_i}$ – координати вектора \vec{k} , що задає напрямок, в якому буде перенаправлятися світловий потік (рис. 2.16);

ψ – кут між цими векторами.

2.4. Розрахунок фотометричного тіла СП, що забезпечує нормативні показники якості освітлення дорожнього покриття

Визначення ефективних (оптимальних) КСС світильників зовнішнього освітлення пов'язане з розв'язком системи рівнянь, складених з умов заданого фіксованого просторового розміщення світлових приладів щодо освітлюваної поверхні. Критерієм ефективності КСС є забезпечення якісних та кількісних показників світлового поля (рівномірність розподілу яскравості або освітленості та нормативні їх значення), яке створюється освітлювальною установкою при мінімальних затратах електроенергії.

Для кожного заданого взаємного розташування світильників за умови їх спільної роботи може бути визначена ефективна КСС, при цьому її характер в значній мірі залежить від того, який кількісний критерій (яскравість або освітленість дорожнього покриття) прийнятий за основу формування світлорозподілу. Такі КСС були розраховані і постійно уточнювались у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки і зміною характеристик дорожніх покриттів [59]. Для досягнення рівномірного розподілу освітленості дорожнього покриття недостатньо забезпечити певну форму КСС в повздовжній чи поперечній площинах. Навіть при відомих КСС в повздовжній та поперечній площині не враховується світлорозподіл в інших площинах, що робить неможливим прогнозування ефективності світлорозподілу світильника в цілому. Найбільш точним результатом при розрахунку ефективного світлорозподілу є визначення фотометричного тіла СП, що дозволить забезпечити рівномірне освітлення горизонтальної поверхні дорожнього покриття в кожній його точці. Результати розрахунку ефективного світлорозподілу використовувались для світлотехнічного розрахунку СП в якості вхідних даних. Розрахунок зводився до визначення функції $I(\varphi, \theta)$ СП.

Основним критерієм, яким керувалися при розрахунку, є коефіцієнт загальної рівномірності освітленості $U_0(E)$, який визначається за формулою:

$$U_0(E) = \frac{E_{\min}}{E_{av}}, \quad (2.30)$$

де E_{\min} – мінімальна освітленість дорожнього покриття;

E_{av} – середня освітленість дорожнього покриття.

Для розрахунку нормованих показників на освітлювальній площині вибиралося розрахункове поле або контрольна ділянка. Для об'єктів зі стандартною геометрією контрольна ділянка є частиною прямолінійного горизонтального полотна дороги, ширина якого дорівнює ширині всієї проїжджої частини W_r , а довжина – кроку S між опорами, розташованими по одній стороні дороги (рис. 2.16).

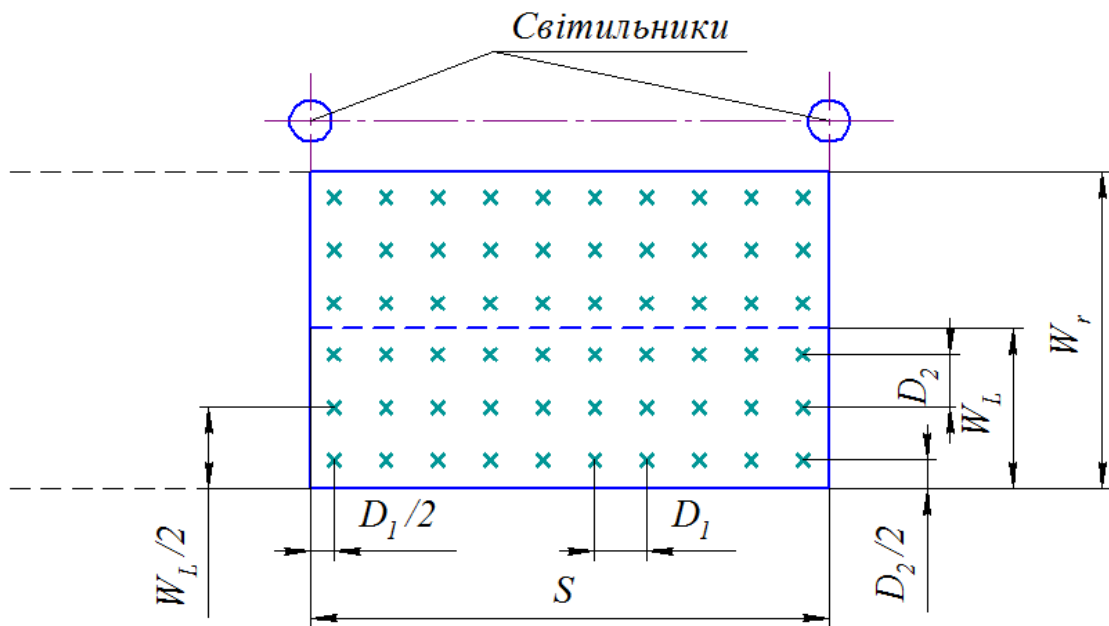


Рис. 2.16. Контрольна ділянка полотна дороги

Число і розташування розрахункових точок на контрольній ділянці вибиралося наступним чином [59]. Якщо $S \leq 30\text{м}$, то число точок в поздовжньому напрямку $N_1 = 10$, якщо $S > 30\text{м}$, то N_1 дорівнюватиме такому найменшому цілому числу, при якому $S / N_1 \leq 3$ м. Точки розташовувались рівномірно з кроком $D_1 = S / N_1$, перша точка відступає від границі контрольної ділянки на відстань $D_1/2$. У поперечному напрямку число точок на смугу дорівнює 3, а крок – відповідно $D_2 = W_L/3$, де W_L – ширина смуги руху. Розташування розрахункових точок на полосі руху показано на рис. 2.16.

При числі смуг N_L загальне число розрахункових точок на контрольній ділянці в поперечному перетині складає $N_2 = 3N_L$, а по всій ділянці – $N = N_1N_2$. Для підвищення точності результатів розрахунку можна збільшити кількість розрахункових точок, але при цьому необхідно дотримуватися зазначених вище рекомендацій, так як аналогічна методика при визначенні числа і розташування розрахункових точок застосовується при фотометричних вимірюваннях в установках зовнішнього освітлення [96 – 98].

Отже, середня освітленість E_{av} розраховувалась за формулою

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (2.31)$$

де E_i – освітленість окремої i -ої елементарної ділянки від M світильників (в даному випадку $M = 2$).

Вважалось, що освітленість в центрі елементарної ділянки дорівнює середній освітленості заданої ділянки, тому для розрахунку було використано вираз для визначення освітленості в i -ій точці (рис. 2.17):

$$E_i = \sum_{j=1}^M \frac{I_{i,j} \cos \theta_{i,j}}{h_j^2}, \quad (2.32)$$

де $I_{i,j}$ – сила світла від j -го СП в напрямку i -ої елементарної ділянки;

h_j – висота розташування j -го СП над полотном дороги;

$\theta_{i,j}$ – кут падіння променя від j -го СП в i -у точку, взяту в центрі i -ої елементарної ділянки.

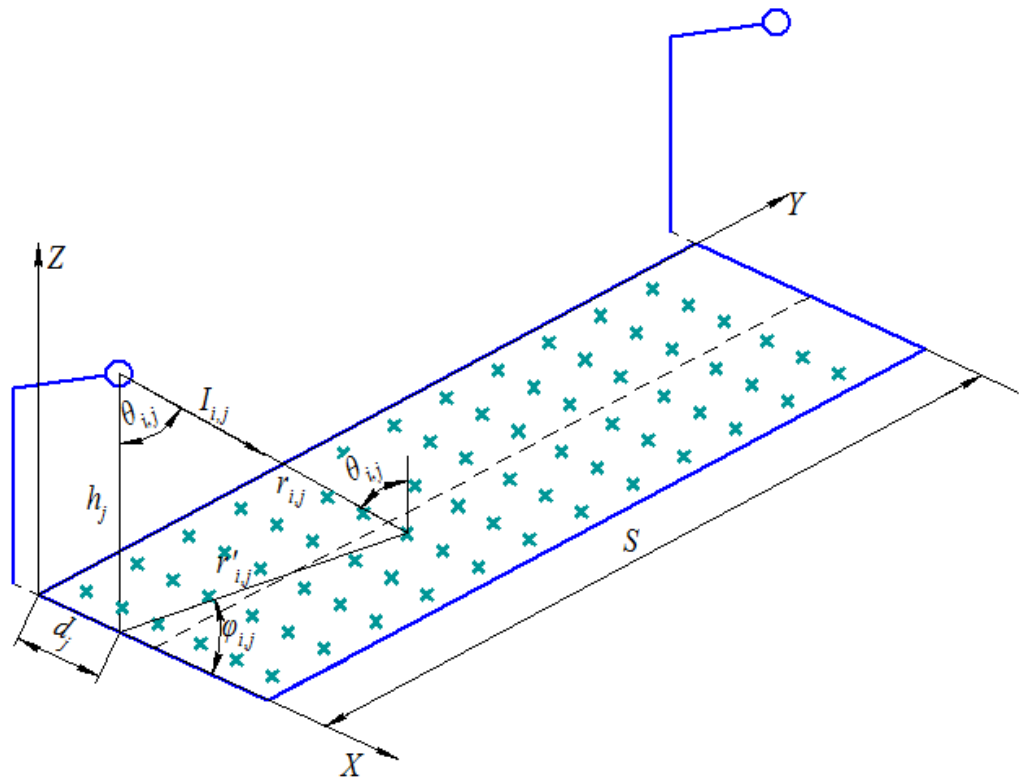


Рис. 2.17. Визначення освітленості в точці контрольної ділянки

Косинус кута $\theta_{i,j}$ визначається по формулі:

$$\cos \theta_{i,j} = \frac{h_j}{r_{i,j}}, \quad (2.33)$$

де $r_{i,j}$ – відстань від j -го СП до i -ої точки, яка дорівнює:

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_i - d_j)^2 + (y_i - S(j-1))^2 + (z_i - h_j)^2}, \quad (2.34)$$

де (x_i, y_i, z_i) – координати i -ої точки;

d_j – відстань, на яку виступає j -ий світильник над поверхнею дорожнього покриття.

Очевидно, що коли $E_i = E_{\min}$, то коефіцієнт $U_0(E)$ прийматиме максимальне значення і буде дорівнювати $U_0(E) = 1$.

Запишемо систему рівнянь для визначення освітленості в кожній i -й точці згідно (2.32):

$$\begin{cases} E_1 = \frac{I_{1,1} \cos^3 \theta_{1,1}}{h_1^2} + \frac{I_{1,2} \cos^3 \theta_{1,2}}{h_2^2} \\ E_2 = \frac{I_{2,1} \cos^3 \theta_{2,1}}{h_1^2} + \frac{I_{2,2} \cos^3 \theta_{2,2}}{h_2^2} \\ \dots \\ E_i = \frac{I_{i,1} \cos^3 \theta_{i,1}}{h_1^2} + \frac{I_{i,2} \cos^3 \theta_{i,2}}{h_2^2} \end{cases}, \quad (2.35)$$

Вираз (2.35) є системою лінійних рівнянь, при розв'язку якої можна визначити сукупність значень $I_{i,j}$.

Для визначення $I_{\varphi,\theta}$ проведено розрахунок кутів $\varphi_{i,j}$ та $\theta_{i,j}$ напрямку сили світла $I_{i,j}$ в екваторіальній та меридіальній площинах:

$$\varphi_{i,j} = \arccos\left(\frac{x_i - d_j}{r'_{i,j}}\right), \quad (2.36)$$

$$\theta_{i,j} = \arccos\left(\frac{h_j}{r_{i,j}}\right), \quad (2.37)$$

На основі вище представленої моделі була розроблена програма розрахунку $I_{\varphi,\theta}$ в середовищі MatLab, алгоритм якої:

- 1) ввід вхідних даних ($d_j, h_j, S, W_L, N_L, E_{\min}$);

- 2) формування контрольних точок розрахункової поверхні згідно рис. 2.17;
- 3) розрахунок масиву значень $\cos \theta_{i,j}$ та $r_{i,j}$ по (2.33), (2.34);
- 4) формування системи рівнянь по (2.35);
- 5) розв'язок системи рівнянь за допомогою оператора *MLDIVIDE* та визначення масиву значень $I_{i,j}$;
- 6) розрахунок кутів $\varphi_{i,j}$ та $\theta_{i,j}$ по (2.36), (2.37) та визначення $I_{\varphi,\theta}$;
- 7) апроксимація отриманих значень за допомогою оператора *INTERP2* та побудова фотометричного тіла.

На основі даного алгоритму було проведено розрахунок фотометричного тіла СП для освітлення дороги, з наступними вхідними даними: $d_j = 1$ м, $h_j = 6$ м, $S = 30$ м, $W_L = 7$ м, $N_L = 2$, $E_{min} = 5$ лк. Отриманий результат наведено на рис. 2.18.

Дане фотометричне тіло використовувалось при розрахунку СП з заданими розмірами та формою ДС.

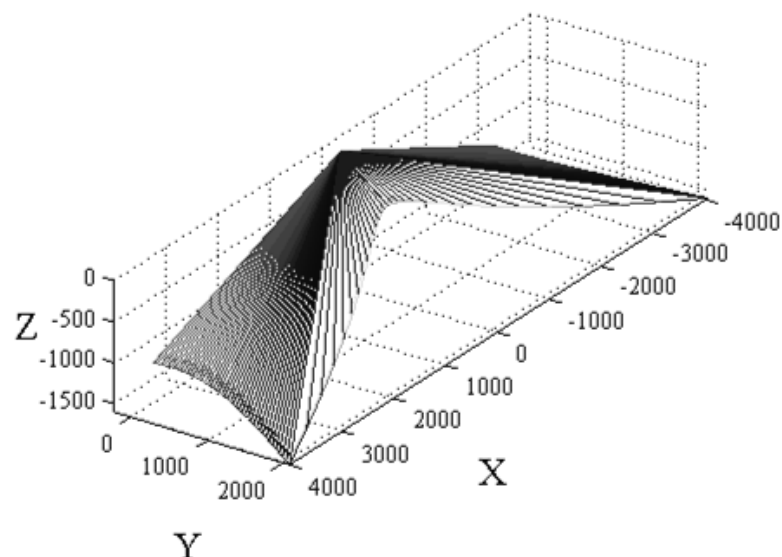


Рис. 2.18. Фотометричне тіла СП, що забезпечує нормативні показники якості освітлення дорожнього покриття

2.5. Світлотехнічний розрахунок СП із КЛЛ для вуличного освітлення

На основі математичних моделей, представлених в пунктах 2.2 – 2.4, було проведено розрахунок відбивача СП для вуличного освітлення з лампою КЛЛ Realux 55 Вт.

Алгоритм розрахунку:

- задаємо вхідні дані для розрахунку (форма та геометричні розміри світлого тіла ДС, необхідне фотометричне тіло СП (рис. 2.18));
- розраховуємо множину профільних кривих відбивача з точковим ДС в різних перетинах фотометричного тіла за методом балансу світлових потоків;
- формуємо поверхню відбивача із сферичних сегментів;
- уточнюємо форму відбивача залежно від геометричних розмірів ДС.

Форма і геометричні розміри світлого тіла джерела світла вибиралися на прикладі лампи Realux 55Вт (рис. 2.19).

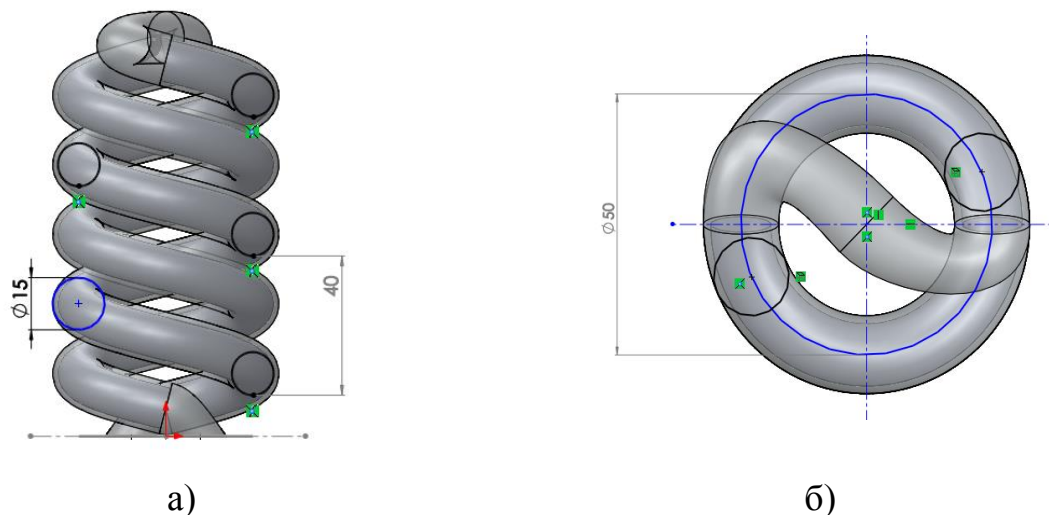


Рис. 2.19. Світне тіло ДС: а) вигляд спереду; б) вигляд зверху

Розрахунок множини профільних кривих відбивача проводили в різних перетинах фотометричного тіла за методом, представленим в пункті 2.3. Отриманні результати представлено на рис. 2.20.

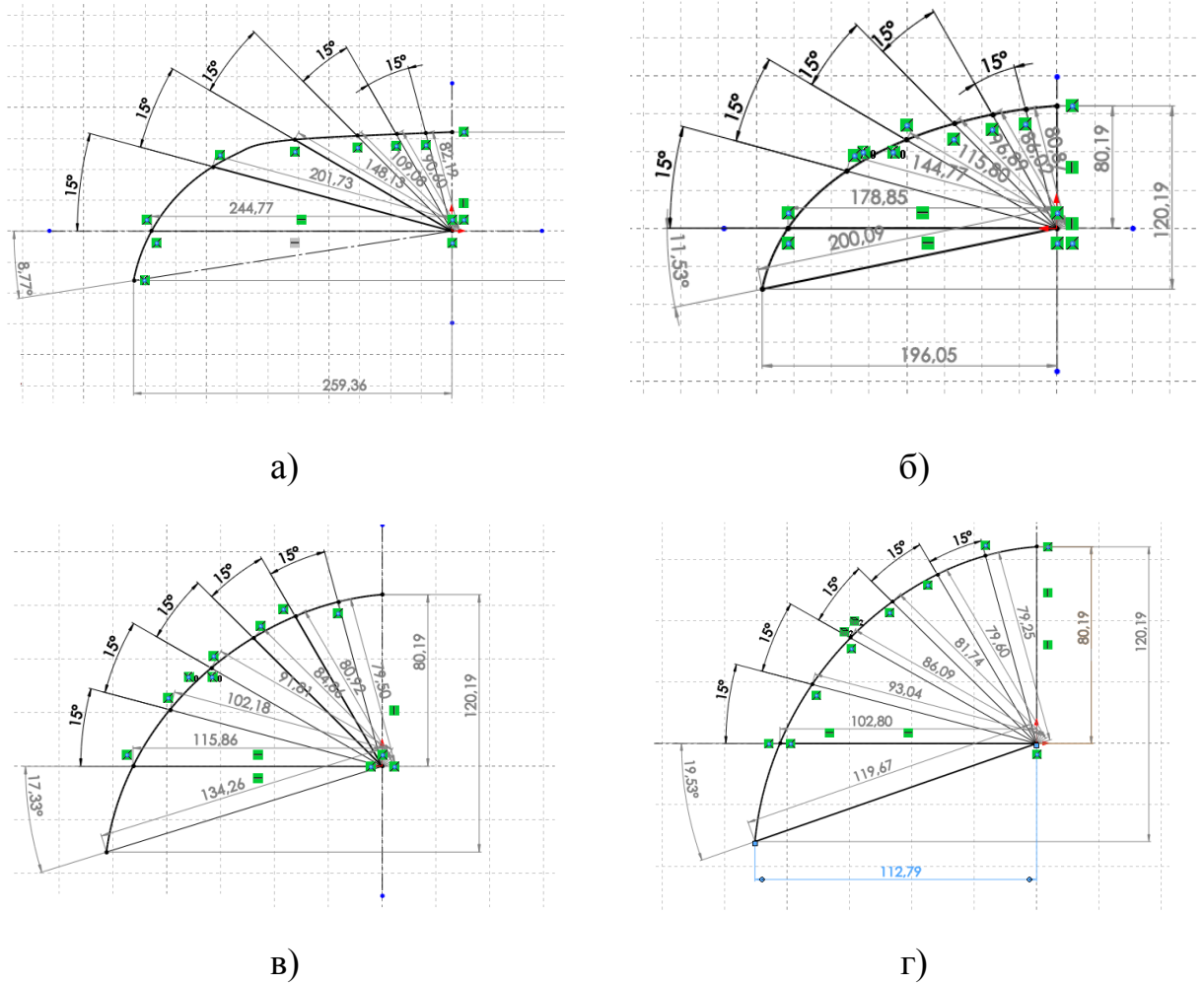


Рис. 2.20. Профільні криві відбивача СП для різних перетинів фотометричного тіла: а) $\varphi = 90^\circ$; б) $\varphi = 60^\circ$; в) $\varphi = 30^\circ$; г) $\varphi = 0^\circ$

За отриманими профільними кривими побудована загальна поверхня відбивача СП в середовищі програми SolidWorks (рис. 2.21).

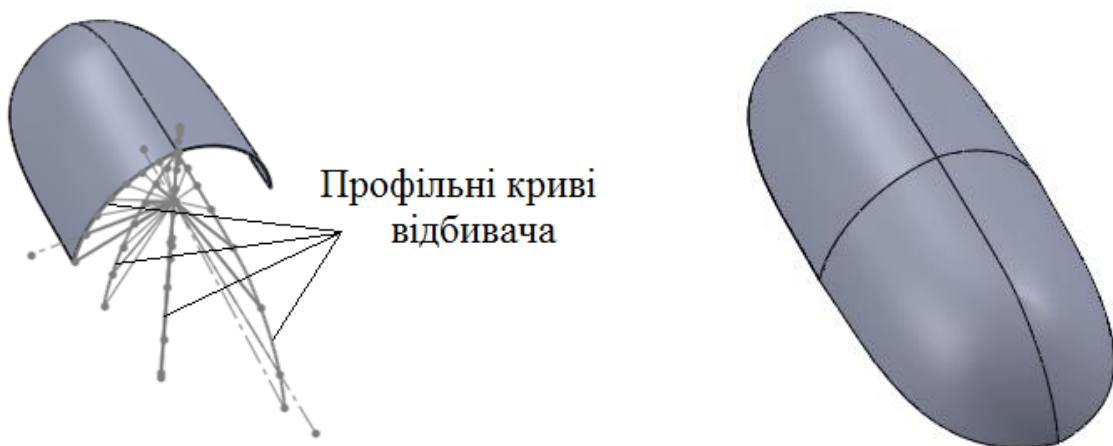


Рис. 2.21. Розрахункова поверхня відбивача СП

В даний СП встановлювалось ДС (рис. 2.22) та проводилося визначення критичної ділянки відбивача згідно геометричної моделі системи «світне тіло – відбивач» (див. рис. 2.15). Отриманий результат наведено на рис. 2.23.

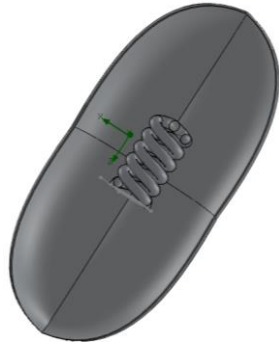


Рис. 2.22. Відбивач СП із світним тілом заданих геометричних розмірів



Рис. 2.23. Критична ділянка відбивача СП

Після цього проводилась зміна форми критичної ділянки за допомогою рівняння (2.29). Поверхня відбивача була представлена масивом точок, отриманих в результаті розрахунку (рис. 2.24).

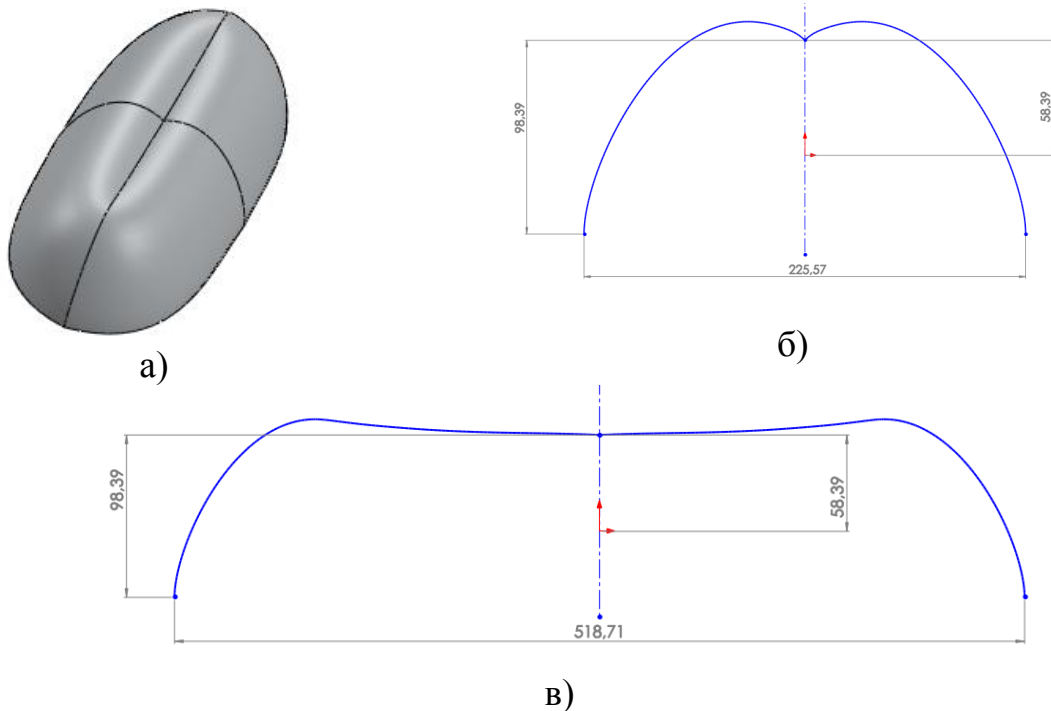


Рис. 2.24. Відбивач СП із КЛЛ: а) 3D модель, б) поперечний переріз поверхні відбивача, в) повздовжній переріз поверхні відбивача

На основі проведених розрахунків поверхні відбивача було виготовлено його фізичну модель за допомогою 3D принтера (рис. 2.25). Товщина стінки відбивача була задана – 2мм, точність нанесення шару матеріалу – 0,3 мм.



Рис. 2.25. Відбивач для СП зовнішнього освітлення із КЛЛ Realux 55Вт

Поверхня відбивача із КЛЛ має дещо складнішу форму, але завдяки цьому дозволяє направляти світловий потік ДС повз поверхню його світного тіла, що, в свою чергу, підвищує ККД світильника.

Для аналізу світлотехнічних параметрів даного СП було проведено експорт геометричної моделі СП із SolidWorks в програму TracePro через формат STEP [99].

За допомогою функціональних можливостей програми TracePro проведено розрахунок кривих сили світла для різних нахилів меридіальної площини (рис. 2.26) та проведено побудову фотометричного тіла СП (рис. 2.27). Світловий потік $\Phi_{СП}$ приводився до умовного світлового потоку $\Phi_{1000} = 1000$ лм.

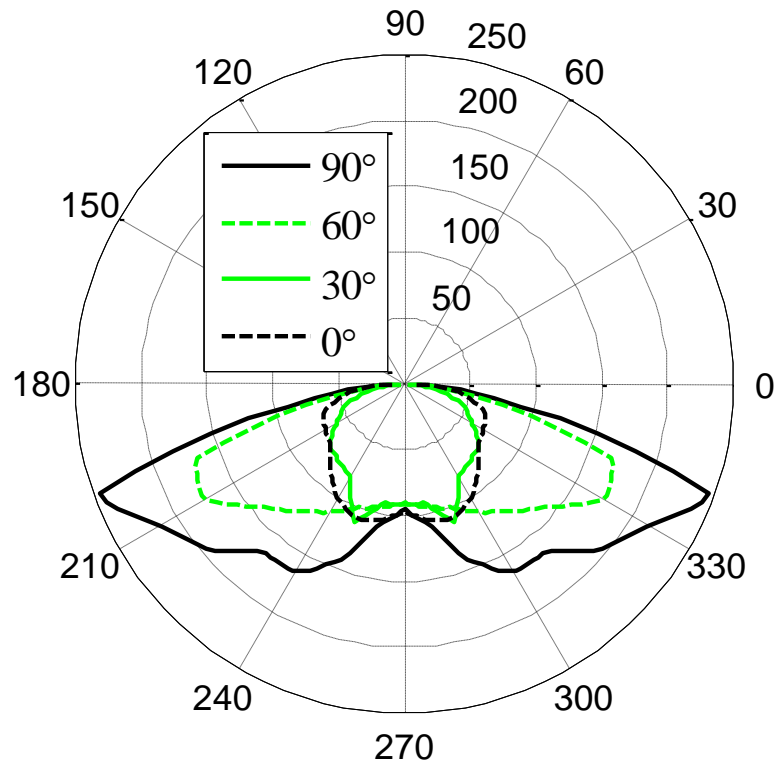


Рис. 2.26. Криві сили світла для СП із КЛЛ

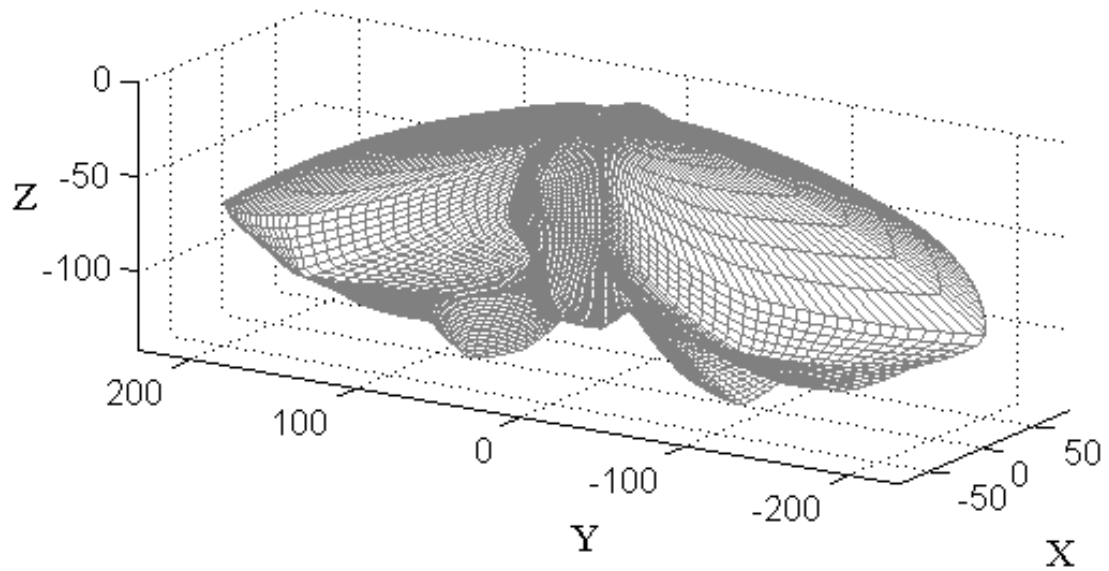


Рис. 2.27. Фотометричне тіло СП із КЛЛ

Дане фотометричне тіло (рис. 2.27) дещо відрізняється від фотометричного тіла (див. рис. 2.18), що задавалося при світлотехнічному

розрахунку даного СП, хоча воно також має широкий світлорозподіл в поперечній площині та глибокий в повздовжній.

Також було проведено оцінку ККД СП $\eta_{СП}$ із різною формою відбивача (див. рис. 2.21, 2.24,а). Для цього визначався світловий потік СП $\Phi_{СП}$ для двох типів відбивачів по формулі (2.1) та розраховувався їх ККД по формулі (2.2). Для відбивача, який був розрахований без урахування геометричних розмірів ДС, ККД $\eta_{СП} = 0,62$. Для СП із КЛЛ, при розрахунку якої було використано додатково розроблену модель, ККД СП $\eta_{СП} = 0,79$. Звичайно розрахункові значення $\eta_{СП}$ дещо завищені, оскільки у досліджуваних СП були відсутні деякі структурні елементи (цоколі для ДС, їх кріплення до корпусу СП і т.п.), але за отриманими даними можна провести загальну оцінку ефективності оптичних систем СП.

Як бачимо із отриманих даних $\eta_{СП}$ із поверхнею відбивача, який був розрахований без урахування геометричних розмірів ДС, на 0,17 нижчий ніж у СП із КЛЛ, де враховані розміри та форма КЛЛ.

2.6. Аналіз світлотехнічних параметрів СП із КЛЛ при зміні геометричних розмірів світного тіла ДС

При використанні в СП ДС із різною формою та розмірами світного тіла його світлотехнічні характеристики змінюються. СП із КЛЛ був розрахований для КЛЛ Realux 55Вт. Оскільки КЛЛ тієї ж потужності можуть мати різну форму та геометричні розміри світного тіла, то доцільно провести аналіз світлотехнічних параметрів даного СП при різних геометричних розмірах світного тіла ДС.

Форма світного тіла задавалася у вигляді паралельно розташованих U-подібних трубок із діаметром $d = 15\text{мм}$ та довжиною $l = 122\text{мм}$. Центри основ U-подібних трубок розміщувалися по колу діаметром $D = 50\text{мм}$ (рис. 2.28).

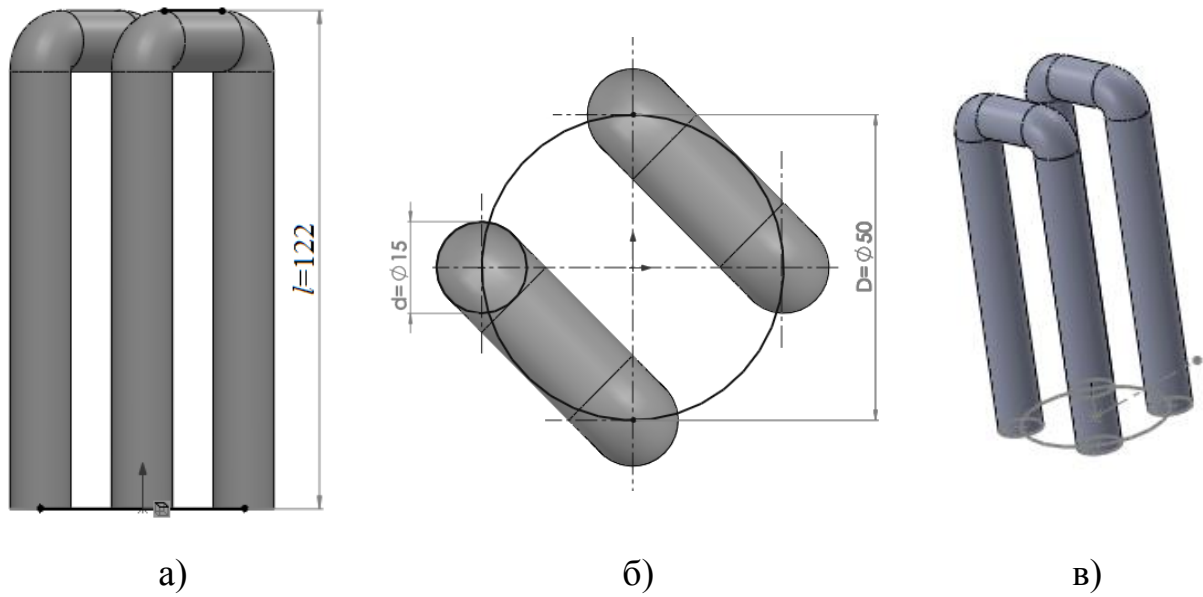


Рис. 2.28. Компактна люмінесцентна лампа із U-подібною формою світного тіла 4-канальна: а) вигляд спереду; б) вигляд зверху; в) 3D модель

По аналогії було створено світні тіла із 6 каналами, 8 каналами та 10 каналами (рис. 2.29). При цьому вважалось, що їх світлові потоки були однаковими.

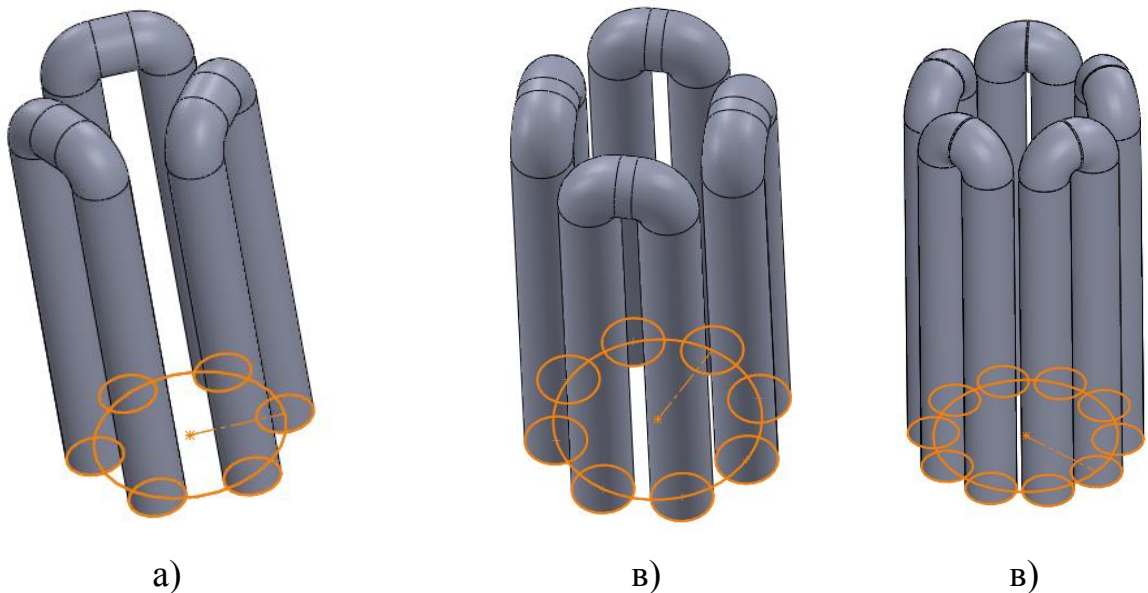


Рис. 2.29. Компактна люмінесцентна лампа із U-подібною формою світного тіла: а) 6-канальна, б) 8-канальна та в) 10-канальна

Для даних ДС проведено розрахунок $\eta_{СП}$ (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Розрахункові значення $\eta_{СП}$ з U-подібною формою світного тіла та різною кількістю каналів

Кількість каналів	Розрахункові значення ККД СП $\eta_{СП}$ із модернізованою поверхнею відбивача
4	0,81
6	0,80
8	0,79
10	0,79

Як бачимо із отриманих даних при дотриманні максимальних розмірів світного тіла $\eta_{СП}$ практично не змінюється, при цьому встановлено, що при зростанні кількості каналів його значення не відрізняється від ККД СП із світним тілом, яке задано у вигляді спіралеподібної трубки.

Проведено дослідження зміни $\eta_{СП}$ при зміні довжини та діаметра світного тіла ДС (рис. 2.30, 2.31).

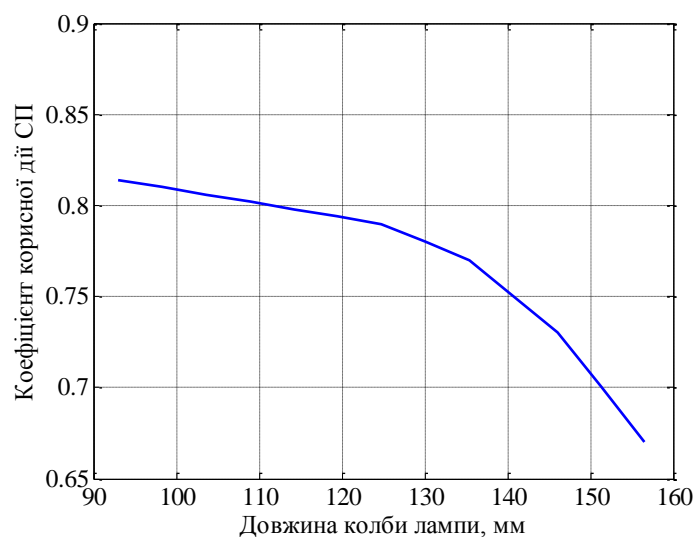


Рис. 2.30. Залежність $\eta_{СП}$ від діаметра колби КЛЛ

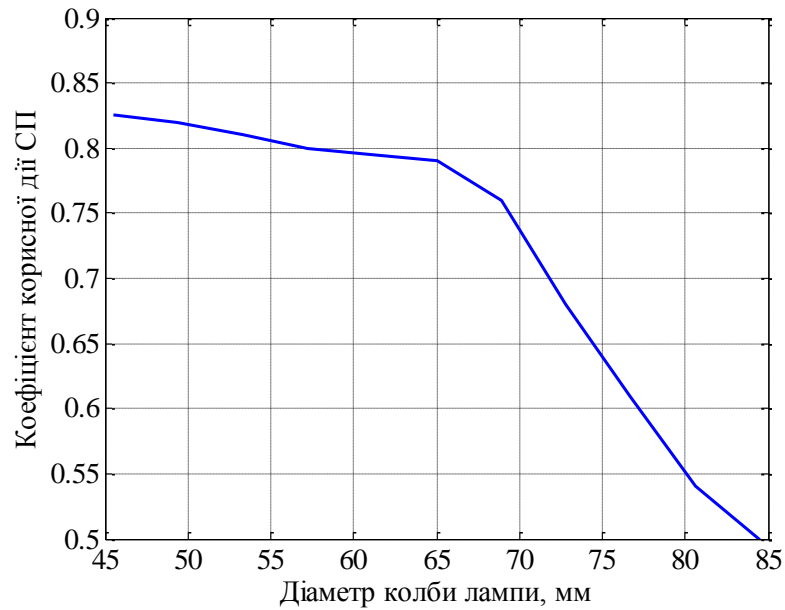


Рис. 2.31. Залежність $\eta_{СП}$ від довжини колби КЛЛ

Із отриманих даних випливає, що збільшення діаметру колби лампи чинить більший вплив на значення $\eta_{СП}$, аніж збільшення її довжини.

Методом співставлення графіків, які зображенні на рис. 2.30 та рис. 2.31, визначено залежність $\eta_{СП}$ від розмірів світного тіла ДС (рис. 2.32).

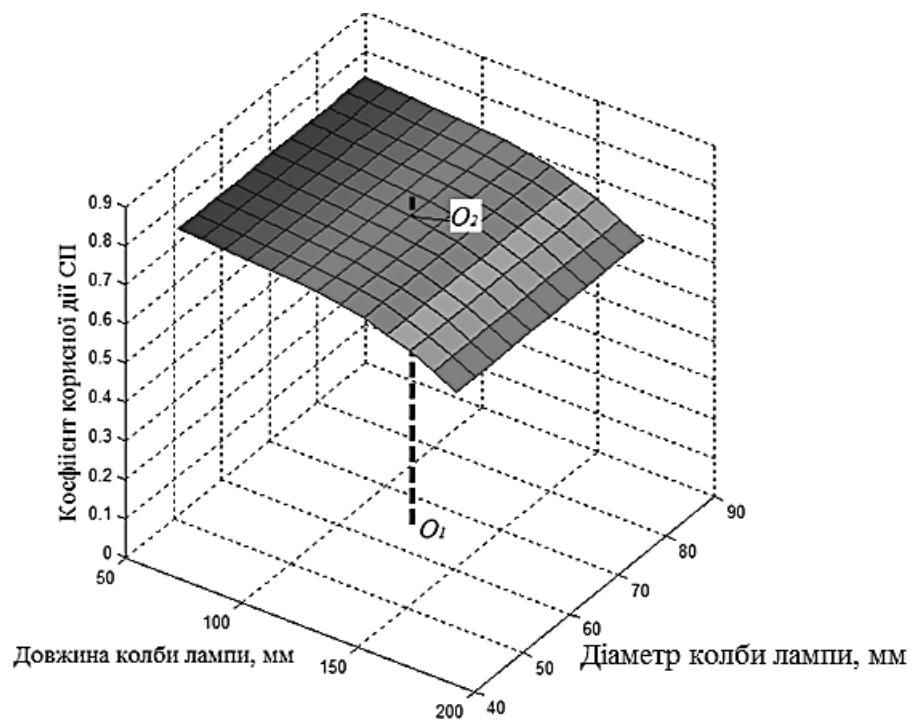


Рис. 2.32. Залежність ККД СП $\eta_{СП}$ від геометричних розмірів лампи

Точка O_1 має координати $(h; D+d; 0)$. Пряма O_1O_2 , яка паралельна вертикальній осі, перетинає поверхню A в точці O_2 із координатами $(h; D+d; \eta_{СП})$.

Залежність, яка представлена на рис. 2.33, дозволяє оцінити значення $\eta_{СП}$ для даного СП при заданих розмірах світного тіла КЛЛ.

Встановлено, що використання в даному СП компактної люмінесцентної лампи меншої потужності, тобто із меншим розмірами світного тіла, приводить до зростання значення $\eta_{СП}$ максимально на 4%, але при зменшенні номінальної потужності КЛЛ їх світлова віддача знижується [100]. Використання більш потужних КЛЛ в даному СП зумовлює зниження $\eta_{СП}$ внаслідок збільшення геометричних розмірів ДС. Тому використовувати лампи занадто низької чи високої потужності недоцільно.

Для того, щоб встановити зв'язок між геометричними розмірами світного тіла ДС та їх номінальною потужністю, було проведено аналіз каталогових даних КЛЛ різних світлотехнічних фірм: АскоУкрЕм, Есоніг, Vitoone, Realux, Maxus, Global, OSRAM, Іскра, Наша сила. При цьому розглядалися лампи з різною формою світного тіла та потужністю від 11 до 105 Вт. Отриманні дані наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Номінальна потужність та геометричні розміри світного тіла КЛЛ

Номінальна потужність КЛЛ, Вт	Максимальний діаметр світного тіла, мм	Максимальна довжина світного тіла, мм
1	2	3
11	40	61
15	40	77
20	40	82
25	46	75
30	46	80

Продовження таблиці 2.4

1	2	3
35	57	82
45	70	92
55	70	125
65	86	128
85	100	138
105	102	155

На основі аналізу даних табл. 2.4 побудовано графічну залежність номінальної потужності КЛЛ від їх геометричних розмірів (рис. 2.33).

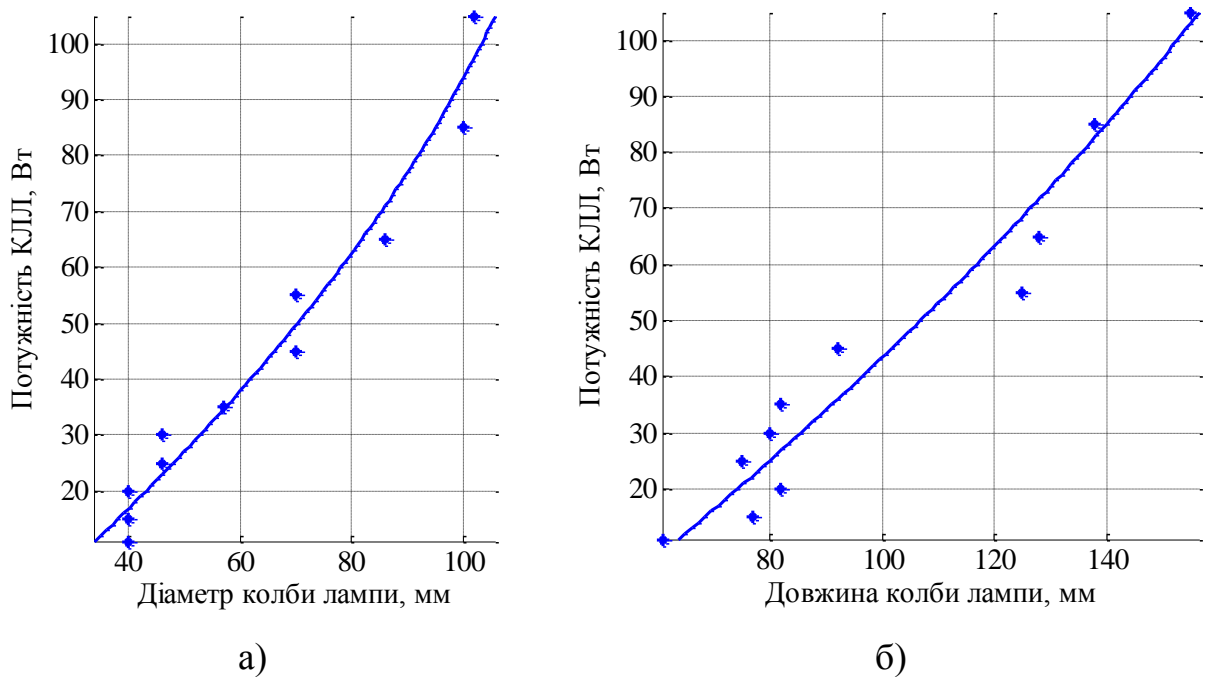


Рис. 2.33. Залежність номінальної потужності КЛЛ від а) діаметра та б) довжини колби

Задавши допустимий діапазон зміни $0,869 \leq \eta_{СП} \leq 0,711$ було визначено максимальні допустимі розміри світного тіла ДС, які можуть бути

використанні в розрахованому СП із КЛЛ: діаметр – від 45 до 72 мм (рис. 2.34), довжина – від 90 до 149 мм (рис. 2.35).

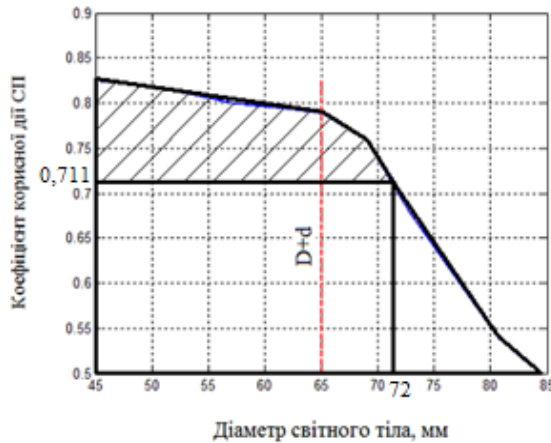


Рис. 2.34. Допустимі зміни діаметра світлого тіла КЛЛ при діапазоні зміни $\eta_{СП} = 0,869...0,711$

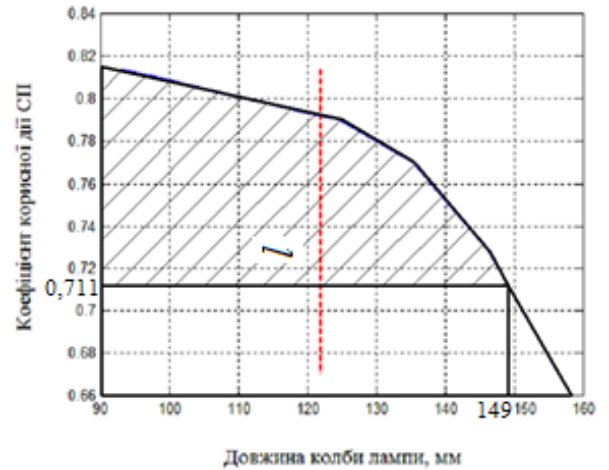


Рис. 2.35. Допустимі зміни довжини світлого тіла КЛЛ при діапазоні зміни $\eta_{СП} = 0,869...0,711$

Допустимим розмірам світного тіла відповідає діапазон допустимих номінальних потужностей КЛЛ від 11 до 53 Вт.

Такий підхід дозволяє оцінити раціональність використання ДС в СП із врахуванням його геометричних розмірів та потужності.

Висновки до розділу:

1. Проведено дослідження можливості взаємозамінності наявних джерел світла на КЛЛ в існуючих СП для зовнішнього освітлення. Встановлено, що безпосередня заміна джерел світла із різною формою світного тіла в світлових приладах призводить до зниження характеристик світлорозподілу та зниження ККД світильників в межах 14 – 17 %.

2. Доповнено математичну модель розрахунку світлового поля КЛЛ, що враховує специфіку геометричних розмірів світного тіла ДС. Це дозволило підвищити точність результатів на 40–60%.

3. Розроблено модель розрахунку фотометричного тіла СП для вуличного освітлення, що забезпечує рівномірне освітлення горизонтальної поверхні дорожнього покриття. Вихідним результатом моделювання є фотометричне тіло, що використовувалось при розрахунку СП з заданими розмірами та формою ДС.

4. Розроблено методики світлотехнічного розрахунок СП для зовнішнього освітлення із КЛЛ, яка дозволяє враховувати геометричні розміри світного тіла та направляти відбитий світловий потік повз його поверхню, за рахунок чого підвищується ККД світильника підвищується на 26 %.

5. Проведено аналіз світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення із КЛЛ при зміні геометричних розмірів світного тіла ДС. Встановлено, що діапазон допустимих номінальних потужностей КЛЛ змінюється від 11 до 53 Вт при розмірах світного тіла: діаметр – від 45 до 72 мм, довжина – від 90 до 149 мм.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК УСТАНОВКИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СП ІЗ КЛЛ

3.1. Математична модель для розрахунку освітлювальної установки вуличного освітлення

Для розрахунку параметрів установки вуличного освітлення з СП із КЛЛ була розроблена її математична модель. Для цього задавалася довжина смуги проїжджої частини 200м. Ширину проїжджої частини задавали в залежності від кількості смуг руху. Ширина однієї смуги для магістральних вулиць і доріг, а також для доріг у промислових і комунально-складських районах – 3,75 м, для житлових вулиць і проїздів – 3,5 м. Геометричні конфігурації вулиць можуть змінюватися в залежності від їх специфіки чи функціональності. Тому задавали геометричні розміри та форму проїжджої частини через поверхню A . Координати розрахункових точок цієї поверхні задавали через масиви A_x , A_y , A_z :

$$A_x = \begin{pmatrix} A_{x1,1} & A_{x1,2} & \dots & A_{x1,j} \\ A_{x2,1} & A_{x2,2} & \dots & A_{x2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{xi,1} & A_{xi,2} & \dots & A_{xi,j} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

$$A_y = \begin{pmatrix} A_{y1,1} & A_{y1,2} & \dots & A_{y1,j} \\ A_{y2,1} & A_{y2,2} & \dots & A_{y2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{yi,1} & A_{yi,2} & \dots & A_{yi,j} \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

$$A_Z = \begin{pmatrix} A_{Z1,1} & A_{Z1,2} & \dots & A_{Z1,j} \\ A_{Z2,1} & A_{Z2,2} & \dots & A_{Z2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{Zi,1} & A_{Zi,2} & \dots & A_{Zi,j} \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Таке представлення проїжджої частини дозволяло проводити побудову геометричної моделі вулиць із ділянками дороги з нестандартною геометрією: повороти, розвилки, в'їзди і з'їзди з естакад, криволінійні (в плані профілю) ділянки і т. п.

Розташування світлових приладів C_k в освітлювальній установці задавалося координатами його оптичного центра в декартовій системі X_k , Y_k , Z_k , де k – номер світлового приладу. Кількість світлових приладів, яка враховувалась при розрахунках показників ОУ, залежить від відстані між ними та визначається за формулою:

$$k = \frac{W_A}{S}, \quad (3.4)$$

де W_A – довжина проїжджої частини;

S – відстань між СП.

Ширина проїжджої частина W_r визначалася за формулою:

$$W_r = nW_L, \quad (3.5)$$

де n – кількість смуг руху;

W_L – ширина однієї смуги руху.

$$I_Y = \begin{pmatrix} I_{Y1,1} & I_{Y1,2} & \dots & I_{Y1,q} \\ I_{Y2,1} & I_{Y2,2} & \dots & I_{Y2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{Yp,1} & I_{Yp,2} & \dots & I_{Yp,q} \end{pmatrix}, \quad (3.7)$$

$$I_Z = \begin{pmatrix} I_{Z1,1} & I_{Z1,2} & \dots & I_{Z1,q} \\ I_{Z2,1} & I_{Z2,2} & \dots & I_{Z2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{Zp,1} & I_{Zp,2} & \dots & I_{Zp,q} \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

Масив значень сил світла $I_{p,q}$ від такого СП в напрямку $\lambda_{p,q}$, $\mu_{p,q}$, $\tau_{p,q}$ визначалася за формулою:

$$I_{p,q} = \sqrt{I_{Xp,q}^2 + I_{Yp,q}^2 + I_{Zp,q}^2}, \quad (3.9)$$

де $\lambda_{p,q}$, $\mu_{p,q}$, $\tau_{p,q}$ – кути між силою світла $I_{p,q}$ та осями координат OX , OY , OZ відповідно. Ці кути визначалися за формулами:

$$\begin{aligned} \lambda_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Xp,q}}{I_{p,q}}\right), \\ \mu_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Yp,q}}{I_{p,q}}\right), \\ \tau_{p,q} &= \arccos\left(\frac{I_{Zp,q}}{I_{p,q}}\right). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для оптимізації положення СП використано вектор \vec{V}_k із початком в точці X_k , Y_k , Z_k . Для СП із круглосиметричним світлорозподілом цей вектор співпадає із його оптичною віссю (рис. 3.2).

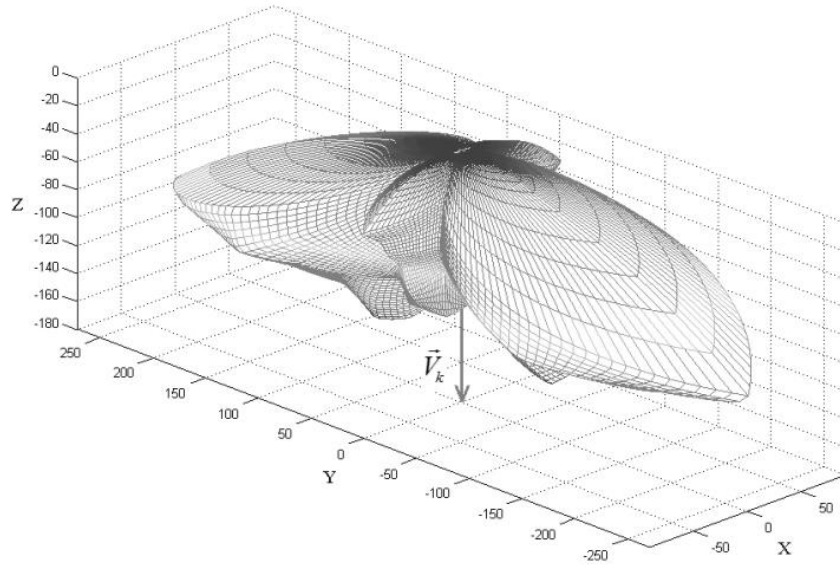


Рис. 3.2. Напрямок вектора \vec{V}_k для СП із круглосиметричним світлорозподілом

Координати V_X, V_Y, V_Z вектора \vec{V}_k задавали через його направляючі косинуси $(\cos \chi_X, \cos \chi_Y, \cos \chi_Z)$, де χ_X, χ_Y, χ_Z – кути між осями координат OX, OY, OZ та вектором \vec{V}_k , відповідно. Довжина даного вектора $|\vec{V}_k|=1$.

Зміну направленості СП задавали поворотом вектора \vec{V}_k разом із поверхнею фотометричного тіла. Обертання в тривимірному просторі представлено як композицію поворотів навколо трьох ортогональних осей. Це здійснювалось матрицями повороту навколо осей декартової системи координат OX, OY, OZ на кути α, β, γ . При цьому розміри фотометричного тіла зберігалися [101, 102]:

$$M_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

$$M_Y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

$$M_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.13)$$

Поворот виконувався шляхом множення матриць повороту на вектор-стовпець, що описує точку, яка буде обертатися:

- поворот точки $I_{X_{p,q}}$, $I_{Y_{p,q}}$, $I_{Z_{p,q}}$ навколо осі OX на кут α

$$\begin{bmatrix} I'_{X_{p,q}} \\ I'_{Y_{p,q}} \\ I'_{Z_{p,q}} \end{bmatrix} = M_X(\alpha) \begin{bmatrix} I_{X_{p,q}} \\ I_{Y_{p,q}} \\ I_{Z_{p,q}} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

- поворот точки $I_{X_{p,q}}$, $I_{Y_{p,q}}$, $I_{Z_{p,q}}$ навколо осі OY на кут β

$$\begin{bmatrix} I'_{X_{p,q}} \\ I'_{Y_{p,q}} \\ I'_{Z_{p,q}} \end{bmatrix} = M_Y(\beta) \begin{bmatrix} I_{X_{p,q}} \\ I_{Y_{p,q}} \\ I_{Z_{p,q}} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

- поворот точки $I_{X_{p,q}}$, $I_{Y_{p,q}}$, $I_{Z_{p,q}}$ навколо осі OZ на кут γ

$$\begin{bmatrix} I'_{X_{p,q}} \\ I'_{Y_{p,q}} \\ I'_{Z_{p,q}} \end{bmatrix} = M_Z(\gamma) \begin{bmatrix} I_{X_{p,q}} \\ I_{Y_{p,q}} \\ I_{Z_{p,q}} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

Отриманий результат повороту фотометричного тіла СП із КЛЛ та вектора \vec{V}_k на кути $\alpha = 18^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ представлено на рис. 3.3.

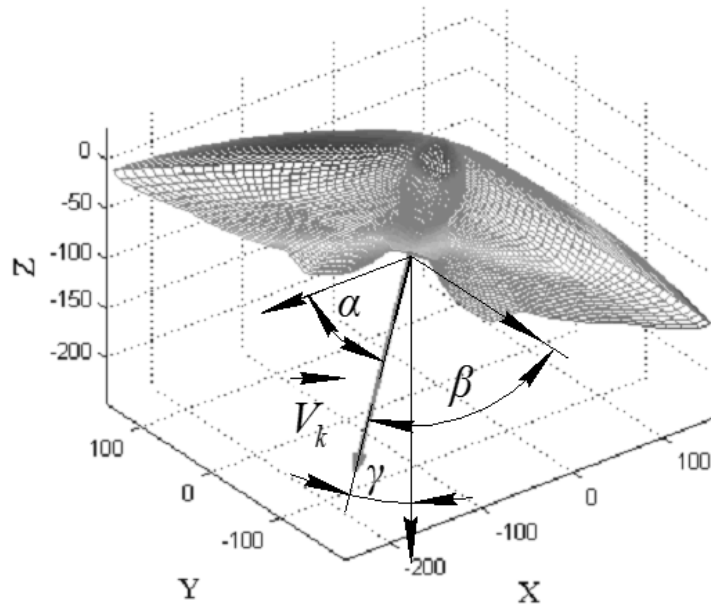


Рис. 3.3. Поворот фотометричного тіла СП із КЛЛ на кути α , β , γ

Освітленість $E_{A_{i,j}}$ елементарної ділянки $dA_{i,j}$ дорожнього покриття визначали за формулою:

$$E_{A_{i,j}} = \sum_{m=1}^k E_{A_{i,j}}^m, \quad (3.17)$$

де $E_{A_{i,j}}^k$ – освітленість елементарної ділянки $dA_{i,j}$ від k -го СП. Ця освітленість розраховувалася за формулою:

$$E_{A_{i,j}}^k = \frac{I_{A_{i,j}}^k}{(l_{A_{i,j}}^k)^2} \cos(\theta_{A_{i,j}}^k), \quad (3.18)$$

де $I_{A_{i,j}}^k$ – сила світла від k -го СП в напрямку ділянки $dA_{i,j}$;

$l_{A_i,j}^k$ – відстань від k -го СП до $dA_{i,j}$;

$\theta_{A_i,j}^k$ – кут падіння сили світла $I_{A_i,j}^k$ в точку $A_{i,j}$, яка є центром ділянки $dA_{i,j}$.

Відстань $l_{A_i,j}^k$ розраховувалась за формулою

$$l_{A_i,j}^k = \sqrt{(A_{X_{i,j}} - X_k)^2 + (A_{Y_{i,j}} - Y_k)^2 + (A_{Z_{i,j}} - Z_k)^2}. \quad (3.19)$$

Кут $\theta_{A_i,j}^k$ розраховувався за формулою

$$\theta_{A_i,j}^k = \frac{Z_k}{l_{A_i,j}^k}. \quad (3.20)$$

Напрямок сили світла $I_{A_i,j}^k$ характеризувався вектором $\vec{l}_{A_i,j}^k$ (див.рис. 3.2).

Кути $\mathcal{G}_{A_{X_{i,j}}}^k$, $\mathcal{G}_{A_{Y_{i,j}}}^k$, $\mathcal{G}_{A_{Z_{i,j}}}^k$, які задавали напрямок сили світла $I_{A_i,j}^k$, розраховували за формулами:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{A_{X_{i,j}}}^k &= \arccos\left(\frac{A_{X_{i,j}} - X_k}{l_{A_i,j}^k}\right), \\ \mathcal{G}_{A_{Y_{i,j}}}^k &= \arccos\left(\frac{A_{Y_{i,j}} - Y_k}{l_{A_i,j}^k}\right), \\ \mathcal{G}_{A_{Z_{i,j}}}^k &= \arccos\left(\frac{A_{Z_{i,j}} - Z_k}{l_{A_i,j}^k}\right). \end{aligned} \quad (3.21)$$

Сила світла $I_{A_i,j}^k$ вибиралась із масиву значень сил світла $I_{p,q}$ (3.5), для

якої кути $\lambda_{p,q}$, $\mu_{p,q}$, $\tau_{p,q}$ співпадали із кутами $\mathcal{G}_{A_{X_{i,j}}}^k$, $\mathcal{G}_{A_{Y_{i,j}}}^k$, $\mathcal{G}_{A_{Z_{i,j}}}^k$, тобто:

$$\text{якщо } \begin{cases} g_{A_{X_i,j}}^k = \lambda_{p,q} \\ g_{A_{Y_i,j}}^k = \mu_{p,q} \\ g_{A_{Z_i,j}}^k = \tau_{p,q} \end{cases}, \text{ тоді } I_{A_{i,j}}^k = I_{p,q} \quad (3.22)$$

На основі даної моделі розроблено програму розрахунку ОУ вулиці в середовищі MatLab, алгоритм якої наступний:

1) ввід вхідних даних:

- A_X, A_Y, A_Z – масивів розрахункових точок проїжджої частини дороги;

- X_k, Y_k, Z_k – координат розташування СП;

- I_X, I_Y, I_Z – масивів точок фотометричного тіла СП;

- $\cos \chi_x, \cos \chi_y, \cos \chi_z$ – координат вектора \vec{V}_k ;

2) вибір напрямку оптичної осі СП згідно (3.11 – 3.16);

3) розрахунок сили світла $I_{p,q}$ та кутів на $\lambda_{p,q}, \mu_{p,q}, \tau_{p,q}$ за формулами (3.9, 3.10);

4) розрахунок масивів значень кутів $g_{A_{X_i,j}}^k, g_{A_{Y_i,j}}^k, g_{A_{Z_i,j}}^k$ (3.21);

5) визначення $I_{A_{i,j}}^k$ за умовою (3.22);

6) розрахунок освітленості $E_{A_{i,j}}^k$ та $E_{A_{i,j}}$ за формулами (3.18), (3.17),

відповідно.

3.2. Розрахунок установки вуличного освітлення із використанням СП із КЛЛ

Основними нормативними показниками освітлення для вулиці із стандартною геометрією є:

- середня яскравість дорожнього покриття $L_{сер}$;

- коефіцієнти загальної U_0 та повздожньої U_1 рівномірності яскравості.

Значення середньої яскравості дорожнього покриття $L_{сер}$ залежить від положення спостерігача і розраховується при його розташуванні на осьовій лінії дороги. З точки зору водія доцільно визначати середню яскравість дорожнього покриття $L_{сер}^n$ для кожної n -ої смуги руху. При цьому орган зору спостерігача розміщувався на висоті 1,5м над осьовою лінією смуги руху на відстані 60м перед межею контрольної ділянки проїжджої частини. Тоді $L_{сер}^n$ розраховувалась як середнє арифметичне значень яскравості $L_{A_{i,j}}^n$ в кожній точці $A_{i,j}$ відносно даного спостерігача:

$$L_{сер}^n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N L_{A_{i,j}}^n. \quad (3.23)$$

Яскравість $L_{A_{i,j}}^n$ розраховувалась за формулою:

$$L_{A_{i,j}}^n = \frac{1}{K_3 \pi} \sum_{m=1}^k r_{A_{i,j}k}^n E_{A_{i,j}}^k, \quad (3.24)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу (згідно [87] $K_3 = 1,6$ для вуличного освітлення)

$r_{A_{i,j}k}^n$ – коефіцієнт яскравості в точці $A_{i,j}$ від k -го СП відносно спостерігача, який розташовувався на n -ій полосі руху. Значення коефіцієнта яскравості для стандартизованих типів дорожніх покриттів вибиралися згідно із [103].

Коефіцієнт U_0 розраховувався як відношення мінімальної яскравості $L_{мін}$ дорожнього покриття до середньої яскравості $L_{сер}$:

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{L_{\text{сер}}} . \quad (3.25)$$

Значення $L_{\text{сер}}$ визначалося як середнє арифметичне значень яскравості $L_{A_i,j}$ в кожній точці $A_{i,j}$:

$$L_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N L_{A_i,j} . \quad (3.26)$$

Яскравість $L_{A_i,j}$ розраховувалась за формулою:

$$L_{A_i,j} = \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^k r_{A_i,j,k} E_{A_i,j}^k . \quad (3.27)$$

де $r_{A_i,j,k}$ – коефіцієнт яскравості в точці $A_{i,j}$ від k -го СП відносно спостерігача, який розташовувався на осьовій лінії дороги.

Мінімальна яскравість L_{\min} визначалася із масиву значень $L_{A_i,j}$.

Коефіцієнт U_1 розраховувався за формулою:

$$U_1 = \frac{L_{1\min}}{L_{1\max}} . \quad (3.28)$$

де $L_{1\min}$, $L_{1\max}$ – мінімальна та максимальна яскравості вздовж осьової лінії дороги.

Значення нормативних показників для автомобільних доріг та вулиць представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення нормативних показників для автомобільних доріг та вулиць

Клас об'єкту	Мінімальні допустимі значення		
	$L_{сер}^n$, кД/м ²	U_0	U_1
М1	2	0,4	0,7
М2	1,5		
М3	1		0,5
М4	0,75		не регламентується
М5	0,5		

Характеристику класу об'єкту згідно класифікації автомобільних доріг і вулиць наведено в [87].

Для визначення масивів A_x , A_y , A_z проїжджої частини, проведено побудову розрахункових точок на контрольній ділянці (див. рис. 2.16). Число точок в поздовжньому напрямку $N_1 = 40$. Точки розташовувались рівномірно з кроком $D_1 = 5\text{ м}$, перша точка відступає від границі проїжджої частини на відстань $D_1/2 = 2,5\text{ м}$. У поперечному напрямку число точок на смугу дорівнює $N_L = 3$, крок, відповідно $D_2 = 1,67\text{ м}$. При числі смуг $n = 2$ загальне число розрахункових точок на контрольній ділянці в поперечному перетині складає $N_2 = 6$. Загальна кількість розрахункових точок на ділянці дороги $N = 240$ (рис. 3.4).

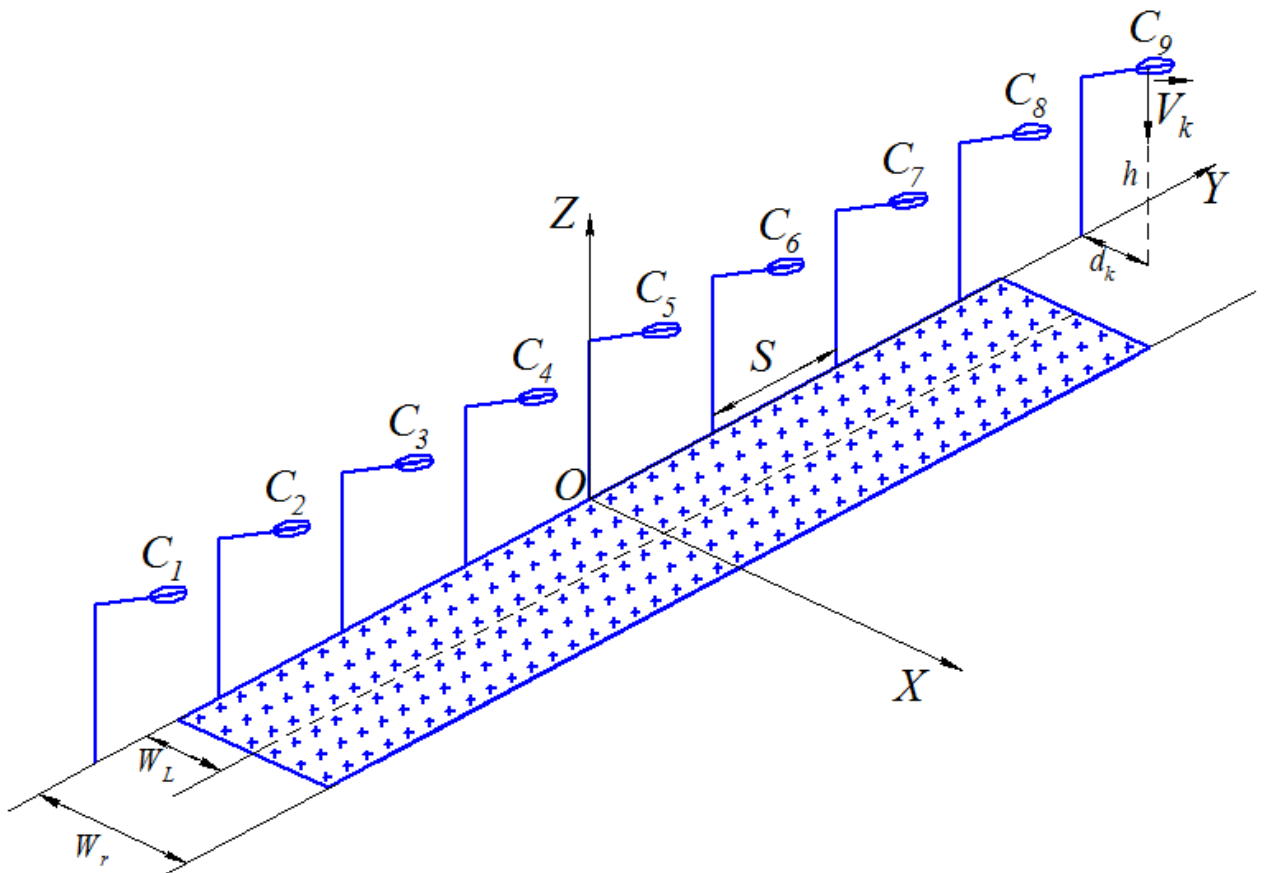


Рис. 3.4. Розташування СП та розрахункових точок в ОУ

СП розташовувалися з однієї сторони проїжджої частини. Висота встановлення СП $h = 6\text{ м}$, відстань між СП $S = 30\text{ м}$, відстань, на яку k -ий світильник виступає над поверхнею дорожнього покриття, $d_k = 1\text{ м}$. Кількість світильників, які бралися до уваги при розрахунках, $k = 9$. На основі цих даних було вибрано наступні координат X_k, Y_k, Z_k розташування СП:

$$X_k = 1, \quad (3.29)$$

$$Y_k = -120 + S(k - 1), \quad (3.30)$$

$$Z_k = 6. \quad (3.31)$$

Вибрано фотометричне тіло СП із КЛЛ із розрахованою поверхнею відбивача (див. рис. 2.28). Оскільки оптична вісь СП була направлена перпендикулярно до поверхні дороги, то вектора \vec{V}_k для кожного k -го СП мав координати:

$$V_x = 0, \quad (3.32)$$

$$V_y = 0, \quad (3.33)$$

$$V_z = 1. \quad (3.34)$$

Для визначення оптимальної орієнтації СП було проведено розрахунок середньої яскравості $L_{сер}^n$ та коефіцієнтів рівномірності яскравості U_0 та U_1 при зміні кута нахилу γ оптичної осі СП до координатної осі OZ в діапазоні від 0° до 90° (рис. 3.5, 3.6).

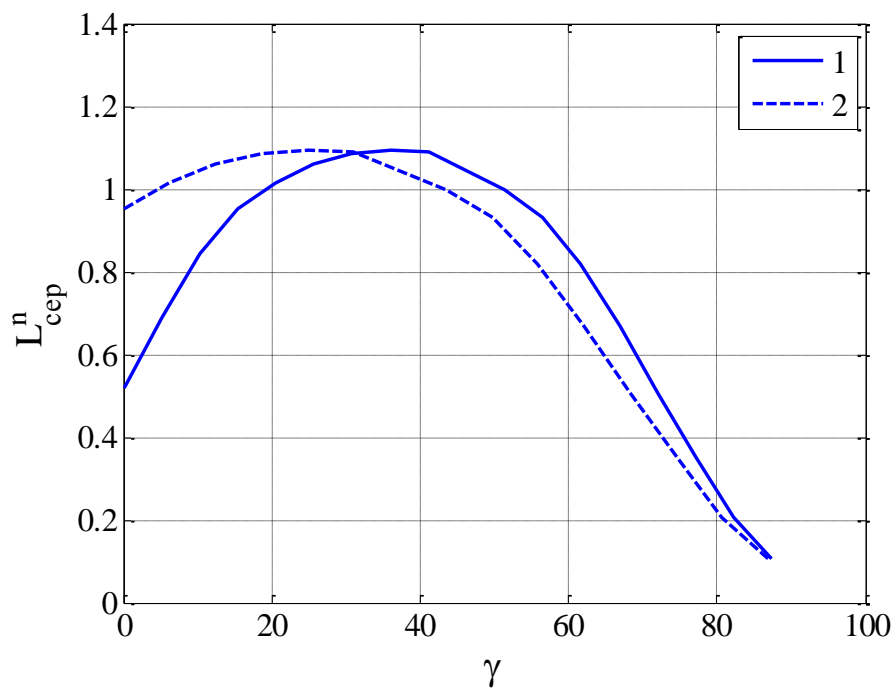


Рис. 3.5. Залежність $L_{сер}^n$ від кута γ : 1 – для першої смуги руху, яка розташована ближче до СП, 2 – для другої смуги руху

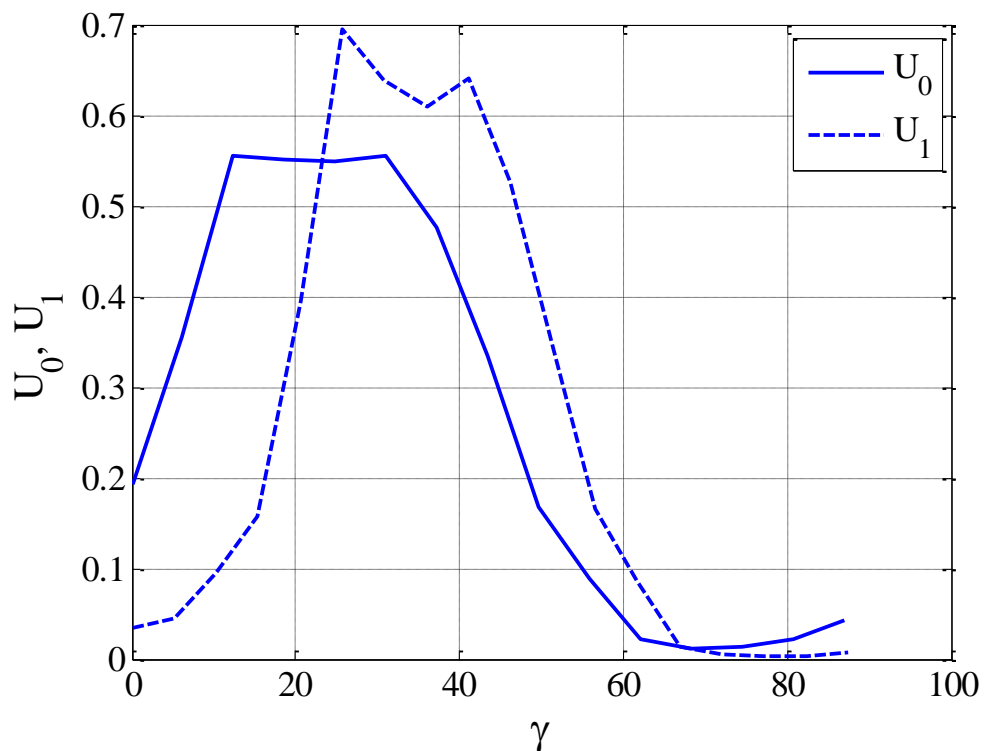


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнтів U_0 та U_1 від кута γ

Як бачимо із рис. 3.5 для досягнення найвищих значень $L_{сер}^n$ вибрано кут $\gamma = 31^\circ$, що є точкою перетину двох кривих. При цьому $L_{сер}^1 = L_{сер}^2 = 1,09$. При даному значенні кута γ коефіцієнти рівномірності яскравості дорівнювали $U_0 = 0,55$, $U_1 = 0,64$.

Згідно значень нормативних показників освітлення доріг (табл. 3.1) розрахункові значення відповідають класу об'єкту М3, М4, М5, а це міжрайонні дороги та дороги із малою інтенсивністю руху.

Для того, щоб визначити максимальну допустиму відстань між опорами $S_{макс}$ для категорій доріг М3, М4 та М5, проведено побудову залежності яскравості $L_{сер}^n$ та коефіцієнтів рівномірності U_0 та U_1 при зміні S в діапазоні від 30 до 60 м з кроком в 1 м (рис. 3.7, 3.8).

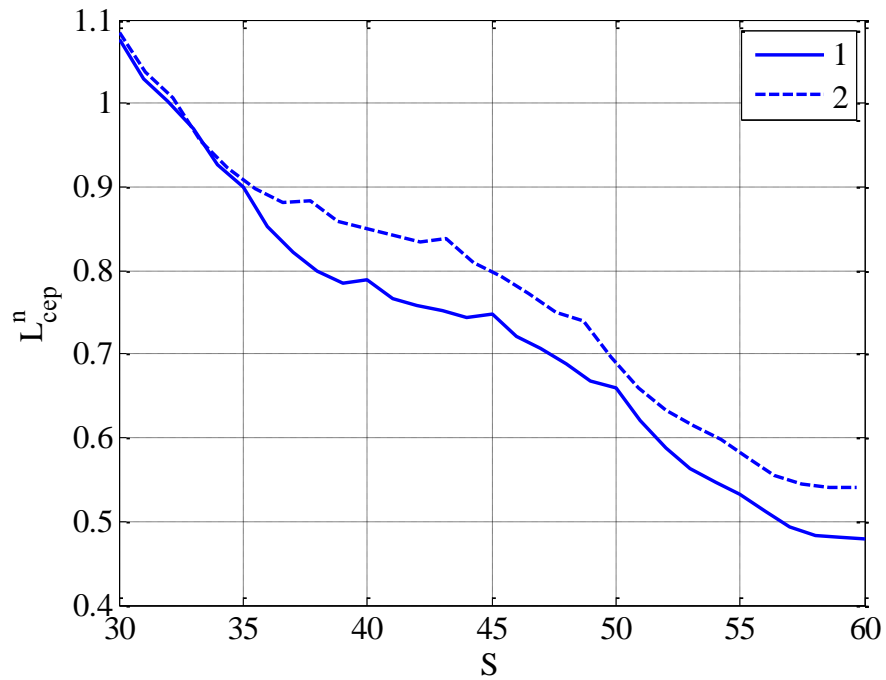


Рис. 3.7. Залежність L_{sep}^n від S : 1 – для першої смуги руху, яка розташована ближче до СП, 2 – для другої смуги руху

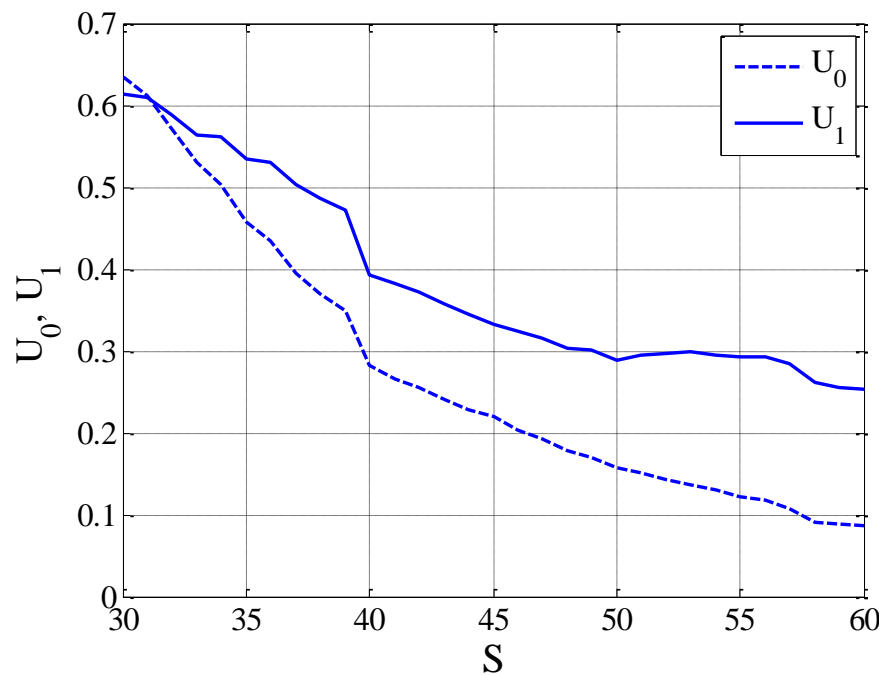


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнтів U_0 та U_1 від S

Із отриманих результатів слідує, що максимальна відстань між опорами для категорій доріг М4 та М5 складає 37м, для М3 – 33м.

Для категорій доріг МЗ проведено побудову розподілу освітленості на поверхні дороги (рис. 3.10).

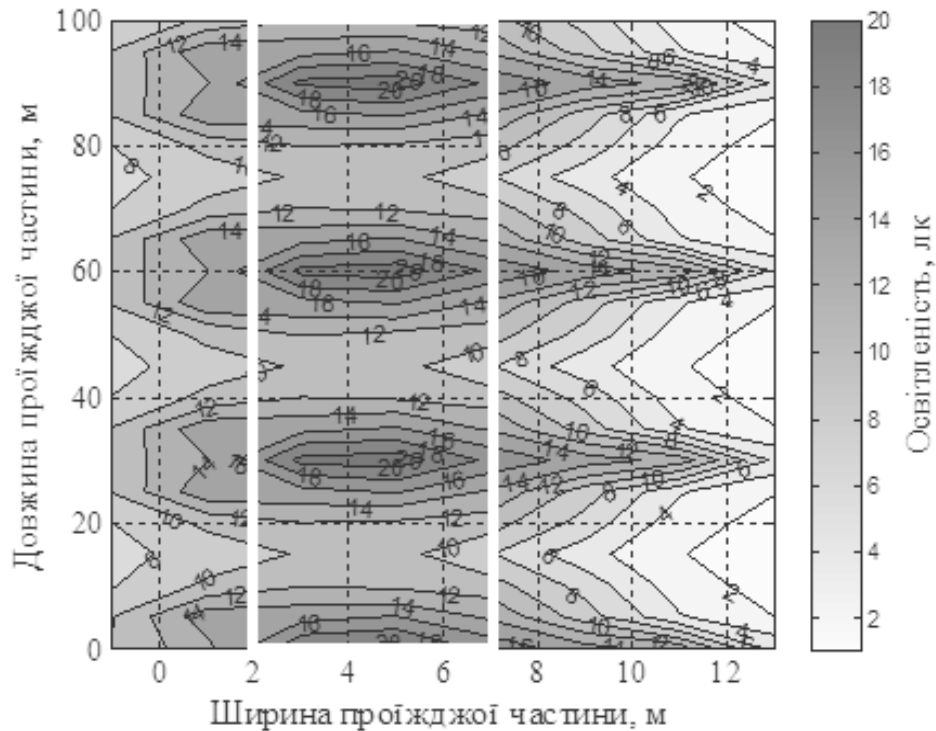


Рис. 3.10. Розподіл освітленості на поверхні дороги
(область поверхні дороги виділена квадратом)

Розрахунок середньої освітленості $E_{сер}$ проводився за формулою:

$$E_{сер} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N E_{A_i,j} . \quad (3.35)$$

Розрахунок коефіцієнта загальної рівномірності освітленості $U_0(E)$ проводили за формулою:

$$U_0(E) = \frac{E_{мін}}{E_{сер}} , \quad (3.36)$$

де E_{\min} – мінімальні освітленість, яка визначалася із значень $E_{A_i,j}$.

При цьому $E_{\text{сер}} = 16,3$ лк, $E_{\min} = 10$ лк та $U_0(E) = 0,61$ при значеннях нормованих показників по освітленості $E_{\text{сер}}^{\text{норм}} = 10$ лк, $U_0(E) = 0,4$.

Висновки до розділу:

1. Побудовано математичну модель освітлення для різних категорій вулиць, яка дозволяє визначати направленість та розташування СП залежно від нормативних вимог.

2. Отримано графічні залежності середньої яскравість дорожнього покриття для кожної смуги руху та коефіцієнтів загальної та повздовжньої рівномірності яскравості від кута нахилу оптичної осі СП. Встановлено, що для досягнення найвищих значень нормативних показників цей кут дорівнює 31° .

3. Отримано графічні залежності середньої яскравість дорожнього покриття для кожної смуги руху та коефіцієнтів загальної та повздовжньої рівномірності яскравості від відстані між СП. На основі отриманих залежностей встановлено, що максимальна допустима відстань між опорами для категорій доріг М4 та М5 складає 37м, для категорії М3 – 33м.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНИХ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Дослідження світлотехнічних параметрів КЛЛ при зміні температури зовнішнього середовища

Робота КЛЛ при температурах повітря, які вищі або нижчі ніж оптимальна, призводить до зниження світлового потоку, зменшення споживаної потужності і зміни світлової віддачі [105 – 108]. Тому для використання КЛЛ у зовнішньому освітленні необхідно провести дослідження впливу температури на їх світлотехнічні характеристики.

Проведено дослідження зміни температури всередині корпусу ЕПРА для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт при температурі зовнішнього середовища +25 °С (рис. 4.1).

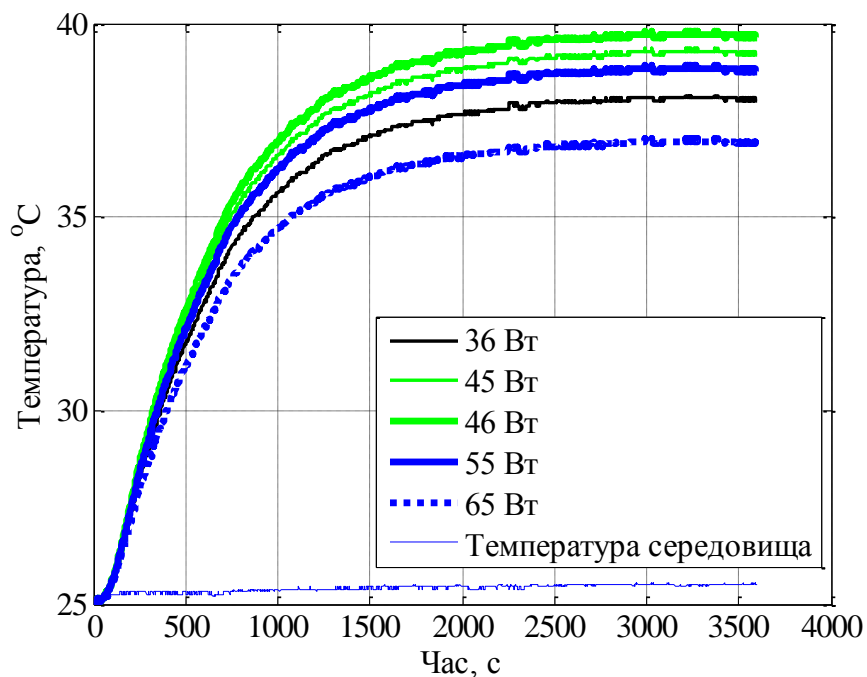


Рис. 4.1. Зміна температури в корпусі ЕПРА при температурі зовнішнього середовища +25 °С

Дослідження проводилися за допомогою температурних датчиків ds18b20 [109], діапазон вимірювань яких складає від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фіксацію температури проводили в інтервалі 0,5 сек. Встановлено, що температура в корпусі ЕПРА при температурі середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищує $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт. Час від моменту включення до стабілізації температури для всіх досліджуваних КЛЛ не перевищував 40 хв. При цьому найбільша температура спостерігалася для КЛЛ потужністю 46 Вт ($39,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), на другому місці КЛЛ 45 Вт ($39,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), на третьому – КЛЛ 55 Вт ($37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), на четвертому – КЛЛ 36 Вт ($37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) і на останньому – КЛЛ 65 Вт ($36,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У дослідженнях характеристик КЛЛ проводилося вимірювання температури ЕПРА при розміщенні КЛЛ в СП для вуличного освітлення закритого типу із високим ступенем захисту IP65 (рис. 4.2).

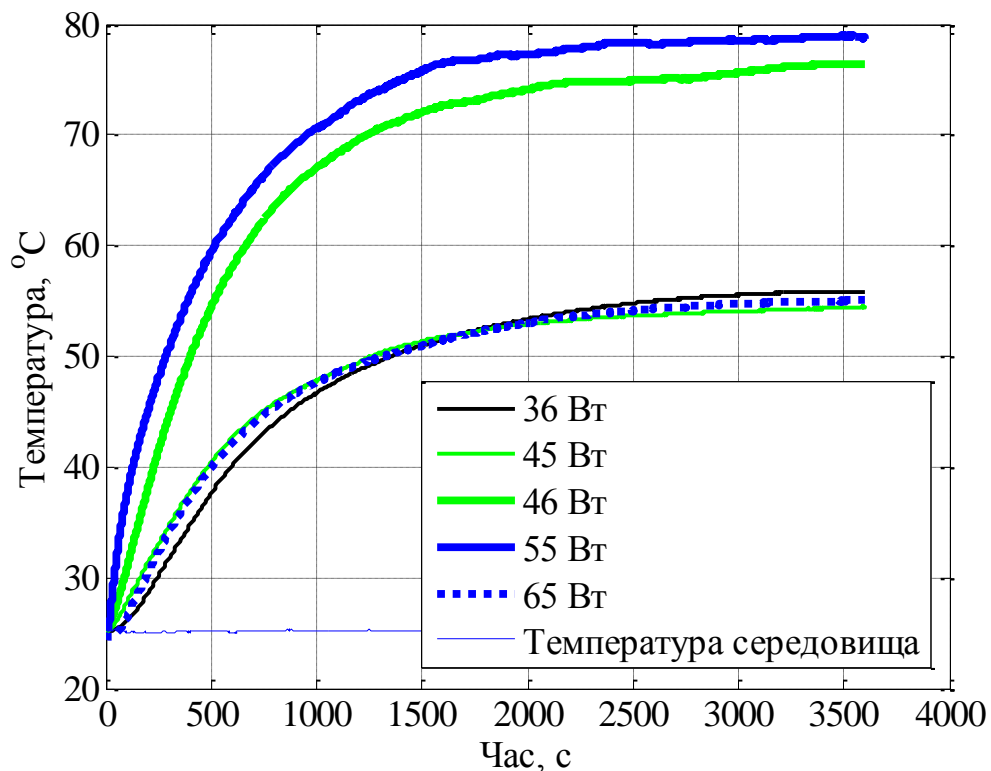


Рис. 4.2. Зміна температури в корпусі ЕПРА при розташуванні КЛЛ в СП закритого типу при температурі зовнішнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Встановлено, що при розташуванні досліджуваних КЛЛ в даному СП температура в корпусі ЕПРА зростає практично до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає допустимій температурі.

При цьому найбільша температура спостерігалася для КЛЛ потужністю 55 Вт ($78,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), на другому місці КЛЛ 46 Вт ($76,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), на третьому – КЛЛ 36 Вт ($55,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), на четвертому – КЛЛ 65 Вт ($55,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) і на останньому – КЛЛ 55 Вт ($54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Із отриманих результатів слідує, що немає прямої залежності температури в корпусі ЕПРА та номінальної потужності КЛЛ. Все залежить від конструктивного виконання корпусу (кількості та величини вентиляційних каналів, теплопровідності пластику, з якого виготовлено корпус і т.п.) та елементної бази з, якої складається ЕПРА.

Проведено дослідження температури колби для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт при температурі зовнішнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.3).

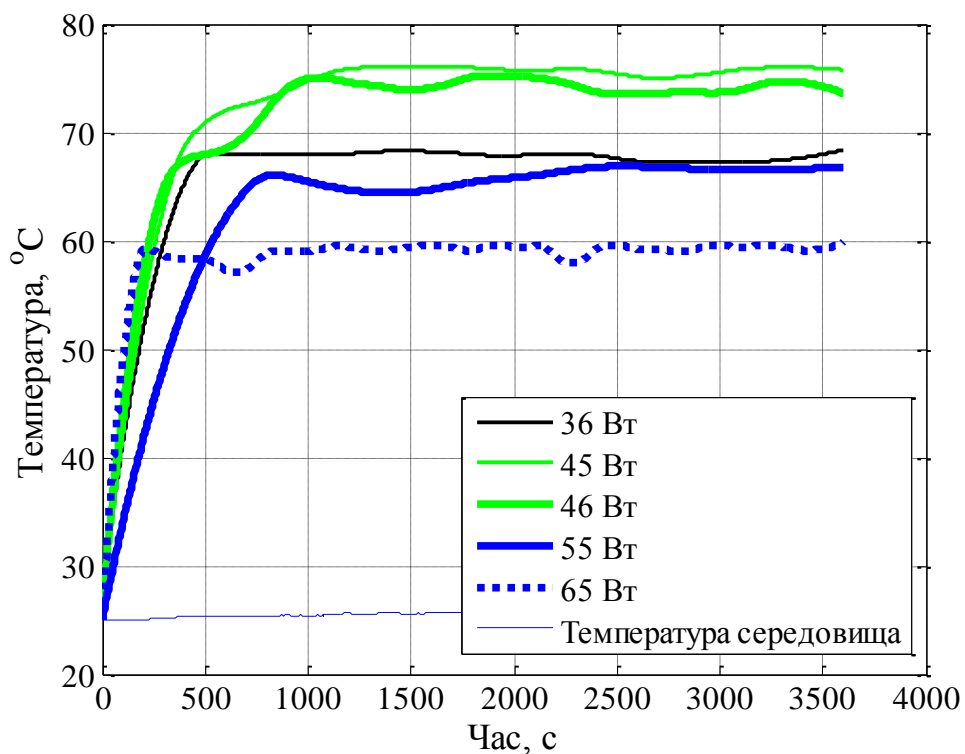


Рис. 4.3. Зміна температури колби КЛЛ при температурі зовнішнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Встановлено, що температура колби КЛЛ при температурі середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищує $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт. Час від моменту включення до стабілізації температури колби для досліджуваних КЛЛ не перевищував 20 хв.

При цьому найбільша температура колби спостерігалася для КЛЛ потужністю 45 Вт ($+76,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), на другому місці КЛЛ 46 Вт ($+75,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), на третьому – КЛЛ 36 Вт ($+68,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), на четвертому – КЛЛ 55 Вт ($+66,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) і на останньому – КЛЛ 65 Вт ($+60,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Аналогічно попереднім досліджень, можна стверджувати, що немає прямої залежності температури колби та номінальної потужності КЛЛ.

Температура колби досліджуваних КЛЛ при розташуванні їх в СП закритого типу зросла до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.4).

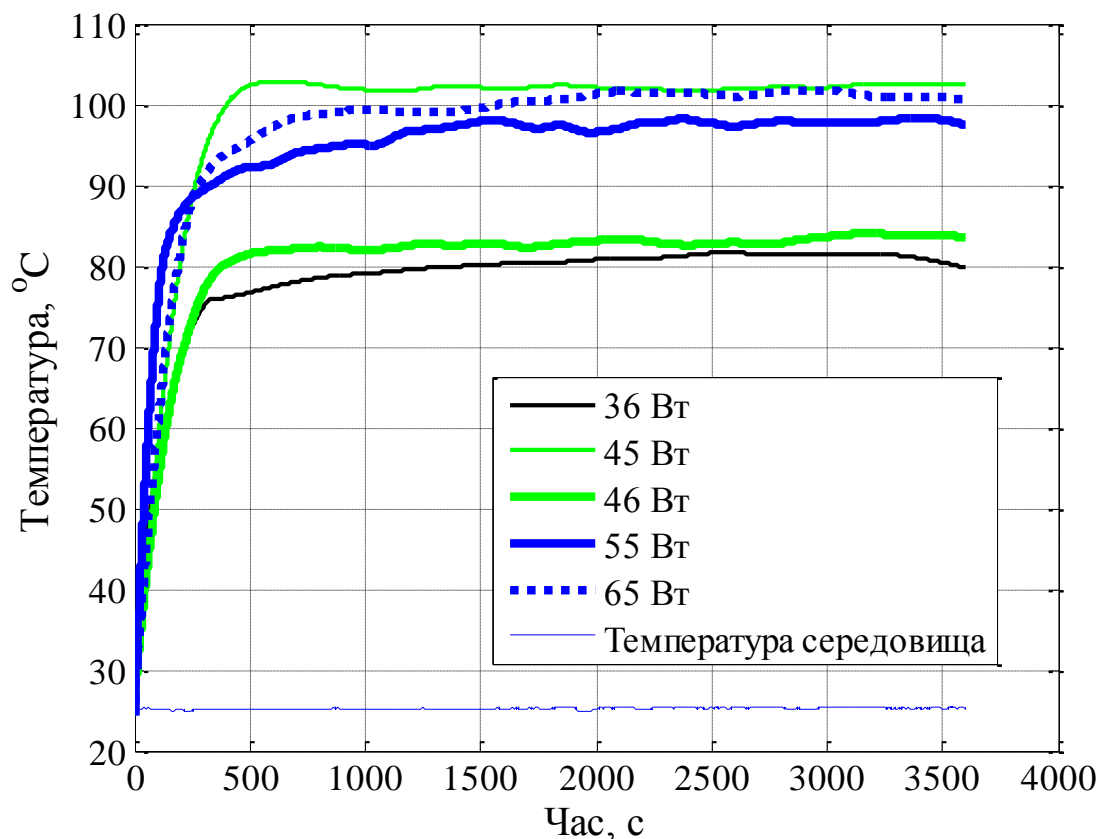


Рис. 4.4. Зміна температури колби КЛЛ в СП при температурі зовнішнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$

При цьому найбільша температура колби спостерігалася для КЛЛ потужністю 45 Вт (+102,9 °С), на другому місці КЛЛ 65 Вт (+101,7 °С), на третьому – КЛЛ 55 Вт (+98,3 °С), на четвертому – КЛЛ 46 Вт (+83,9 °С) і на останньому – КЛЛ 36 Вт (+81,4 °С). Час від моменту включення до стабілізації температури колби КЛЛ в СП не перевищував 10 хв.

Проведено вимірювання температури повітря в СП із КЛЛ. При цьому встановлено, що температура повітря в СП при включенні КЛЛ зростала практично до +40 °С (рис. 4.5).

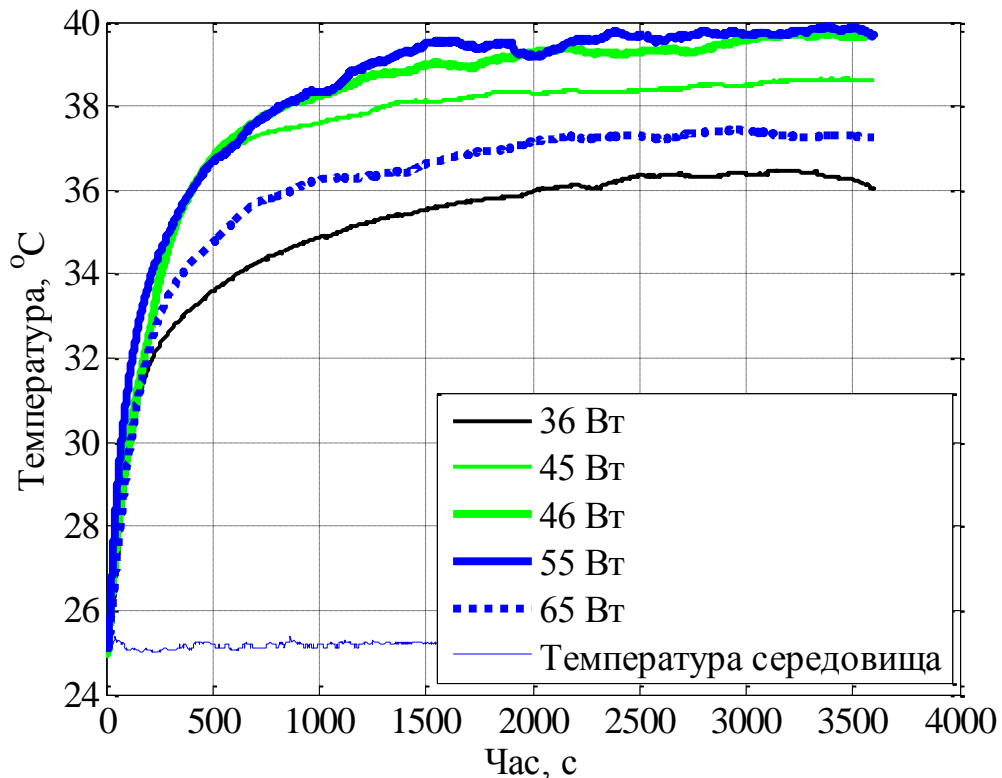


Рис. 4.5. Зміна температури повітря в СП із КЛЛ при температурі зовнішнього середовища +25 °С

При цьому найбільша температура повітря в СП спостерігалася для КЛЛ потужністю 55 Вт (+39,8 °С), на другому місці КЛЛ 46 Вт (+39,6 °С), на третьому – КЛЛ 45 Вт (+38,6 °С), на четвертому – КЛЛ 65 Вт (+37,3 °С) і

на останньому – КЛЛ 36 Вт (+36,4 °С). Час від моменту включення до стабілізації температури повітря в СП не перевищував 40 хв.

Підвищення температури повітря в СП при експлуатації КЛЛ зумовлює зниження світлового потоку лампи. Встановлено, що при використанні КЛЛ в СП світловий потік знижувався в середньому на 5 – 6 %. На рис. 4.6 приведена гістограма відношення величини світлового потоку КЛЛ в СП до світлового потоку лампи поза СП при температурі зовнішнього середовища +25 °С.

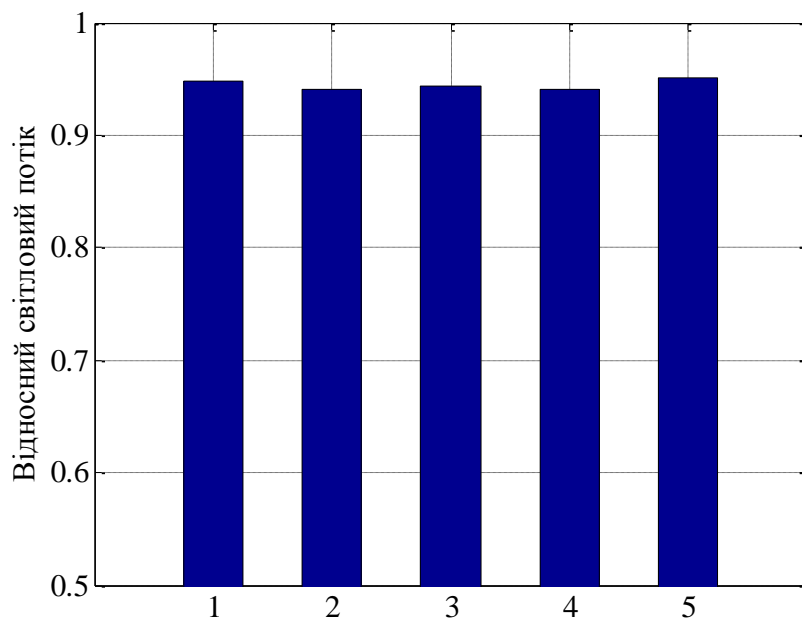


Рис. 4.6. Гістограма відношення величини світлового потоку КЛЛ потужністю 1) 36 Вт, 2) 45 Вт, 3) 46 Вт, 4) 55 Вт, 5) 65 Вт в СП до світлового потоку ламп поза СП при температурі зовнішнього середовища +25 °С

Проведено вимірювання потужності КЛЛ при їх роботі поза світловим приладом та в ньому. Встановлено, що при роботі ламп в закритих світильниках їх потужність знижувалася на 5 – 10 % (рис. 4.7).

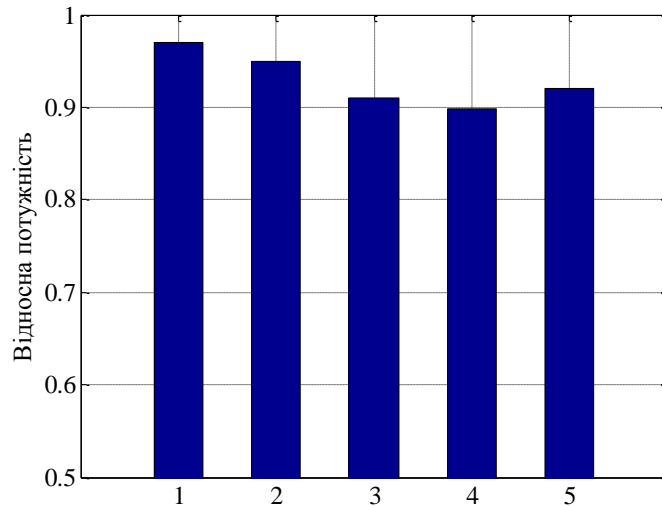


Рис. 4.7. Гістограма відношення потужності КЛЛ 1) 36 Вт, 2) 45 Вт, 3) 46 Вт, 4) 55 Вт, 5) 65 Вт в СП до потужності ламп поза СП при температурі зовнішнього середовища +25 °С

На рис. 4.8 приведена гістограма відношення світлової віддачі КЛЛ в СП до світлової віддачі лампи поза СП при температурі зовнішнього середовища +25 °С.

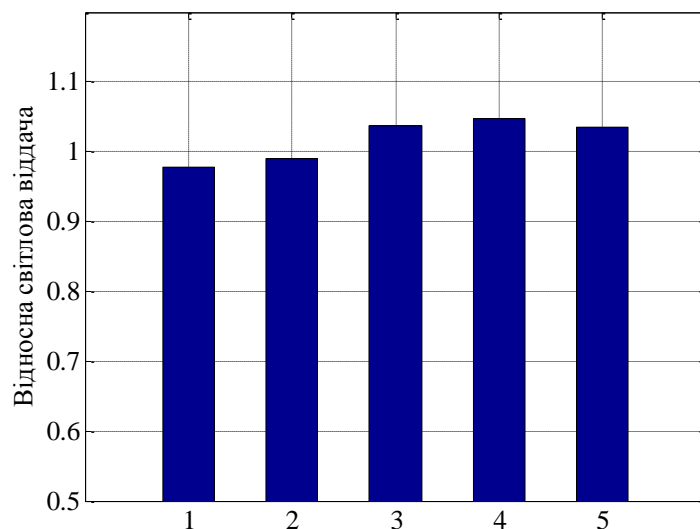


Рис. 4.8. Гістограма відношення світлової віддачі КЛЛ потужністю 1) 36 Вт, 2) 45 Вт, 3) 46 Вт, 4) 55 Вт, 5) 65 Вт в СП до світлової віддачі ламп поза СП при температурі зовнішнього середовища +25 °С

Проведено дослідження КЛЛ в області низьких температур. Це пов'язано з особливістю їх експлуатації в осінньо-зимовий період. Для даних досліджень було розроблена та змонтована експериментальна установка, блок-схема якої приведена на рис. 4.9.

Дослідна установка складається із термоізоляційної камери із розмірами: висота – 0,8м, ширина – 0,5м та глибина 0,5м. Термодатчик визначав температуру в камері та передавав інформацію на терморегулятор, який керував холодильним агрегатом. Холодильний агрегат дозволяв охолоджувати середовище в камері до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

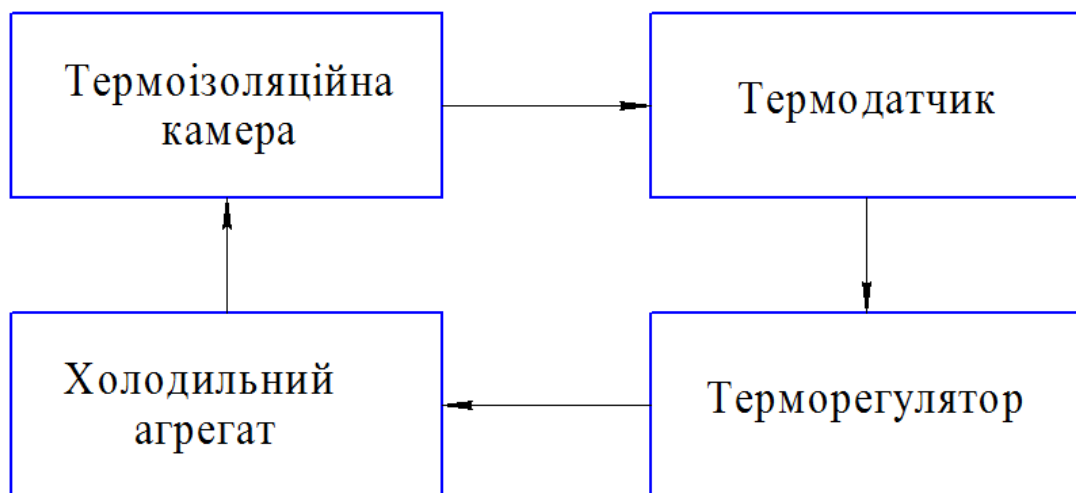


Рис. 4.9. Блок-схема установки для дослідження залежності світлотехнічних параметрів КЛЛ від температури зовнішнього середовища

Методика експерименту зводилась до дослідження світлового потоку при різних температурах зовнішнього середовища. Зміна світлового потоку фіксувалася за допомогою фоторезистора GL5516 [110]. Температурний інтервал роботи даного фоторезистора складає -30 до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що при зниженні температури середовища до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ світловий потік досліджуваних КЛЛ знижувався 17-20 % (рис. 4.10).

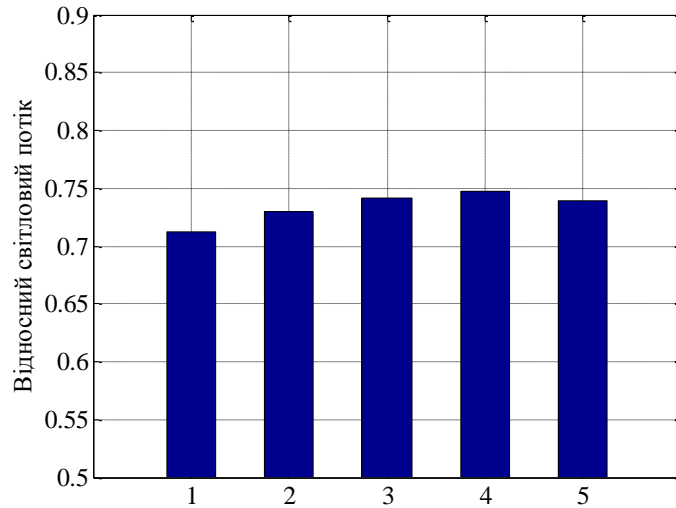


Рис. 4.10. Гістограма світлового потоку КЛЛ потужністю 1) 36 Вт, 2) 45 Вт, 3) 46 Вт, 4) 55 Вт, 5) 65 Вт відносно номінального при температурі зовнішнього середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналогічний експеримент проведено при розміщенні КЛЛ в термоізоляційній камері разом із СП. Встановлено, що при використанні КЛЛ в закритих СП при температурі зовнішнього середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ їх світловий потік знижується на 6 – 8 % (рис. 4.11).

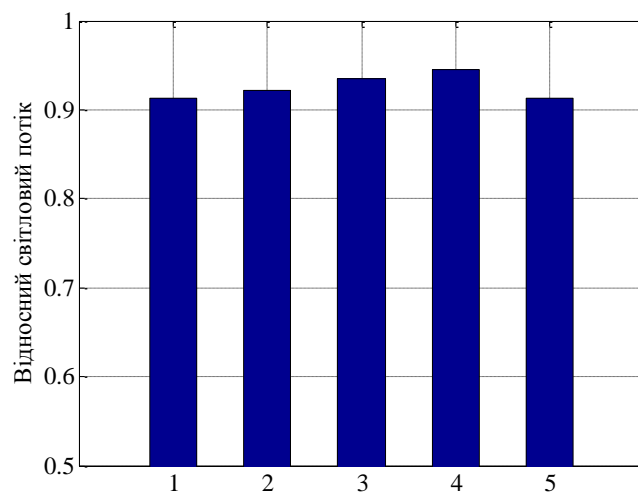


Рис. 4.11. Гістограма світлового потоку КЛЛ потужністю 1) 36 Вт, 2) 45 Вт, 3) 46 Вт, 4) 55 Вт, 5) 65 Вт відносно номінального, які розміщувалися в СП при температурі зовнішнього середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Встановлено, що використання КЛЛ в СП зовнішнього освітлення при низьких температурах зовнішнього середовища дозволяє зменшити вплив останньої на світловий потік даних ДС. Це зумовлено зростанням температури повітря всередині СП (рис. 4.12).

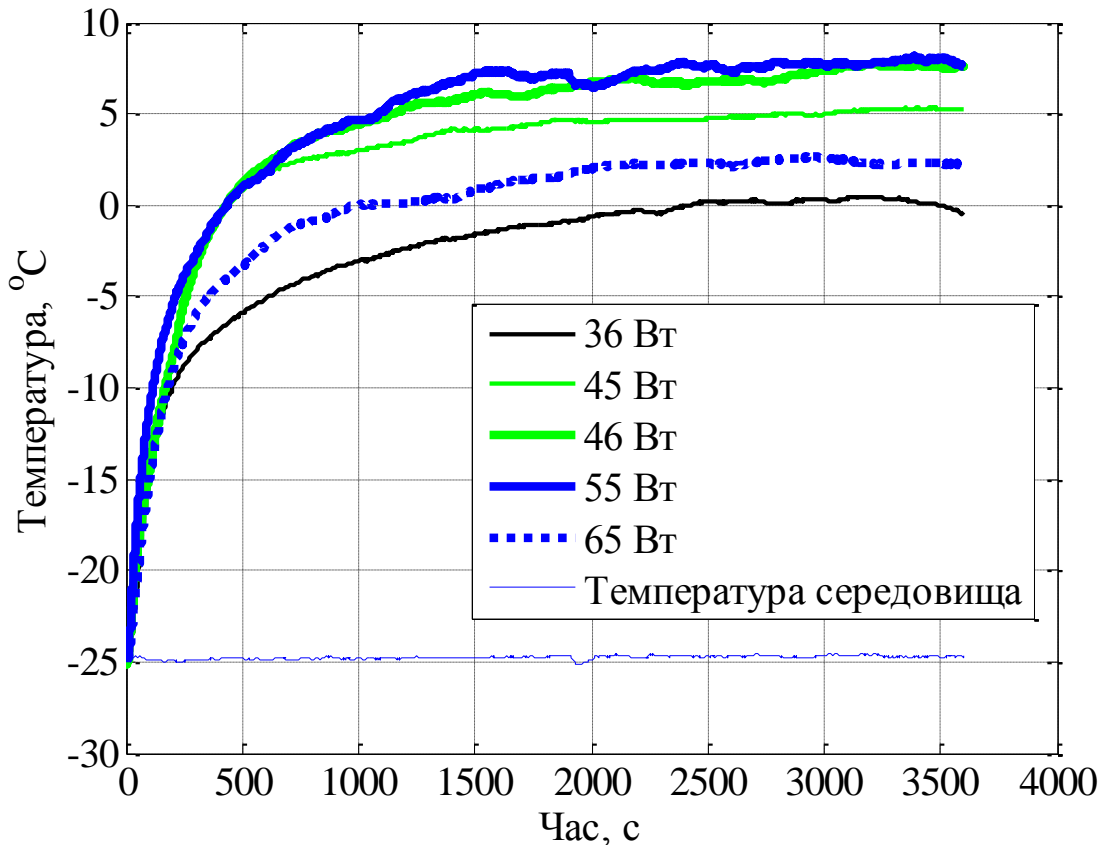


Рис. 4.12. Зміна температури повітря в СП із КЛЛ при температурі середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

При дослідженні світлотехнічних характеристик КЛЛ отримано залежність світлового потоку від температури зовнішнього середовища (рис. 4.13).

Встановлено, що зміні температури зовнішнього середовища від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура в СП із КЛЛ змінюється в діапазоні від $+10$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, світловий потік змінюється в діапазоні від 0,92 до 1 відносно номінального.

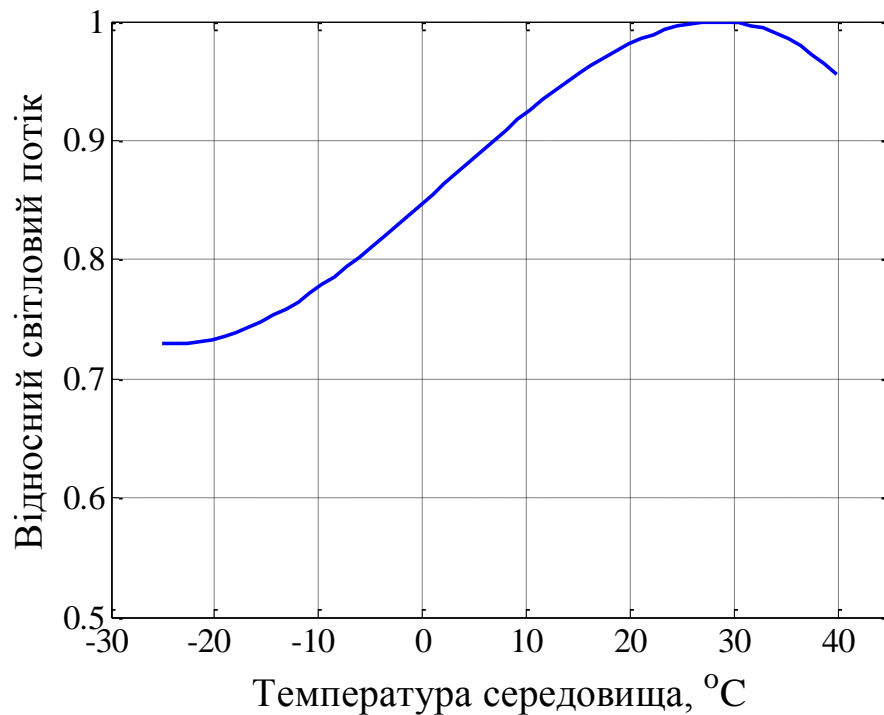


Рис. 4.13. Залежність світлового потоку КЛЛ від температури зовнішнього середовища

4.2. Комп'ютерне моделювання теплового режиму СП зовнішнього освітлення із КЛЛ

Для моделювання теплового режиму СП зовнішнього освітлення із КЛЛ проведено вимірювання температури колби лампи при зміні температури зовнішнього середовища в діапазоні від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика експерименту полягала у наступному. Досліджуванні зразки КЛЛ із СП розміщувались в термоізоляційній камері (див. рис. 4.9), температура якої в початковий момент часу становила $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Лампа вмикалася та очікувалося 1 год. для стабілізації її температурного режиму. Після чого термоізоляційну камеру повільно охолоджували до температури $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, одночасно фіксуючи зміну температури колби лампи та ЕПРА (рис. 4.14).

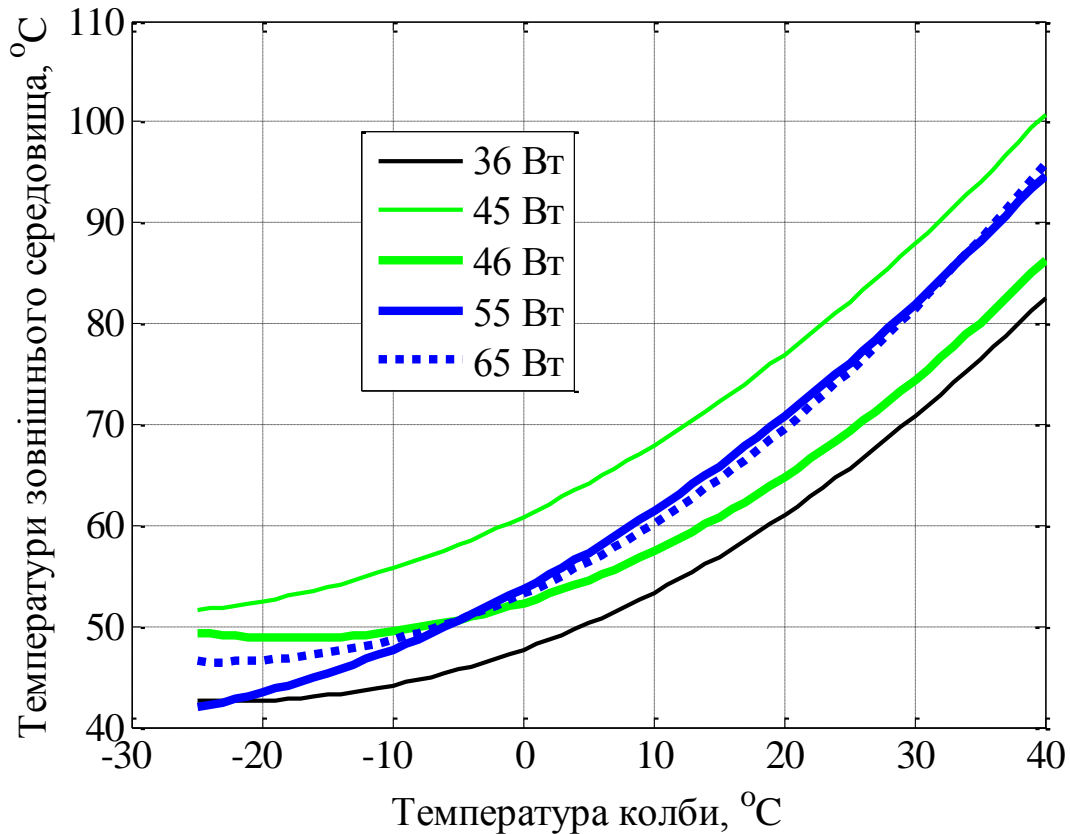


Рис. 4.14. Залежність температури колби лампи КЛЛ від температури зовнішнього середовища

Встановлено, що для КЛЛ потужністю від 36 Вт до 65 Вт температура колби ламп змінюється в діапазоні від +37 °C до +103 °C при зміні температури зовнішнього середовища від -25 °C до +40 °C. При цьому залежності температури колби лампи КЛЛ від температури зовнішнього середовища для всіх досліджуваних ламп суттєво не відрізняються.

Проведено вимірювання розподілу температури на поверхні колби лампи (рис. 4.15). Методика експерименту зводилася до визначення температури в шести точках на поверхні світного тіла КЛЛ, які розташовувались рівномірно по всій довжині колби лампи.

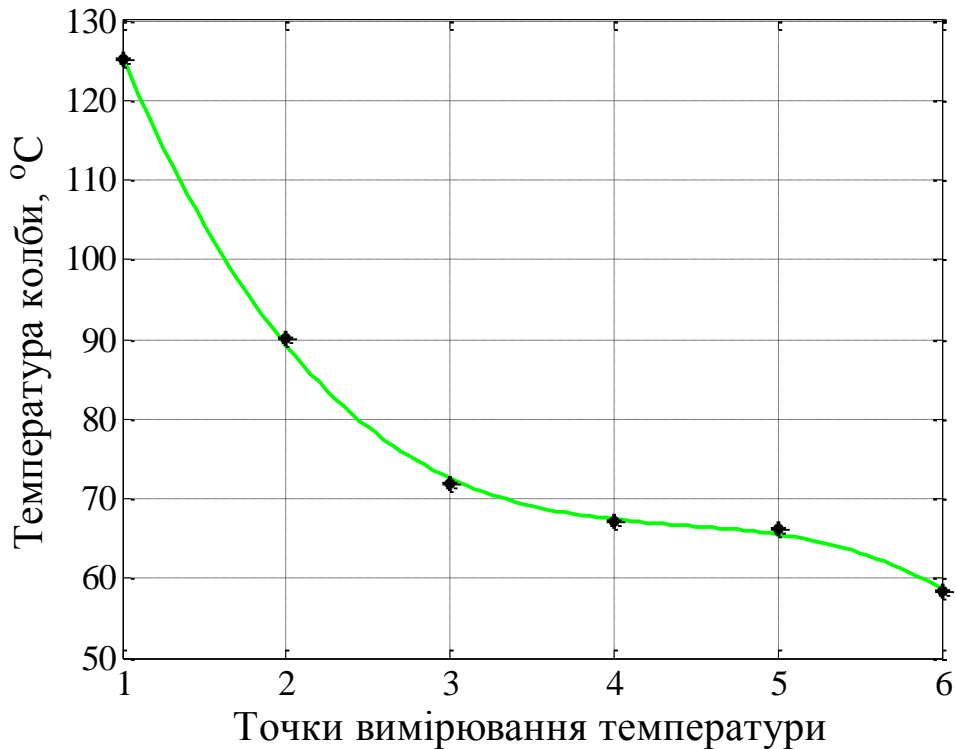


Рис. 4.15. Розподіл температури на поверхні колби КЛЛ

Встановлено, що розподіл температури на колбі лампи є нерівномірний. Максимальна та мінімальна температури нагріву колби КЛЛ спостерігалися на краях лампи (точки 1 та 6, відповідно). Температура по поверхні середини колби суттєво не змінювалась (точки 3, 4, 5).

Проведено вимірювання температури в корпусі ЕПРА при зміні температури зовнішнього середовища в діапазоні $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.16). Встановлено, що для КЛЛ потужністю від 36 Вт до 65 Вт температура ЕПРА змінюється в діапазоні від $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+103\text{ }^{\circ}\text{C}$ при зміні температури зовнішнього середовища від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому залежності температури ЕПРА КЛЛ від температури зовнішнього середовища для всіх досліджуваних ламп суттєво не відрізняються.

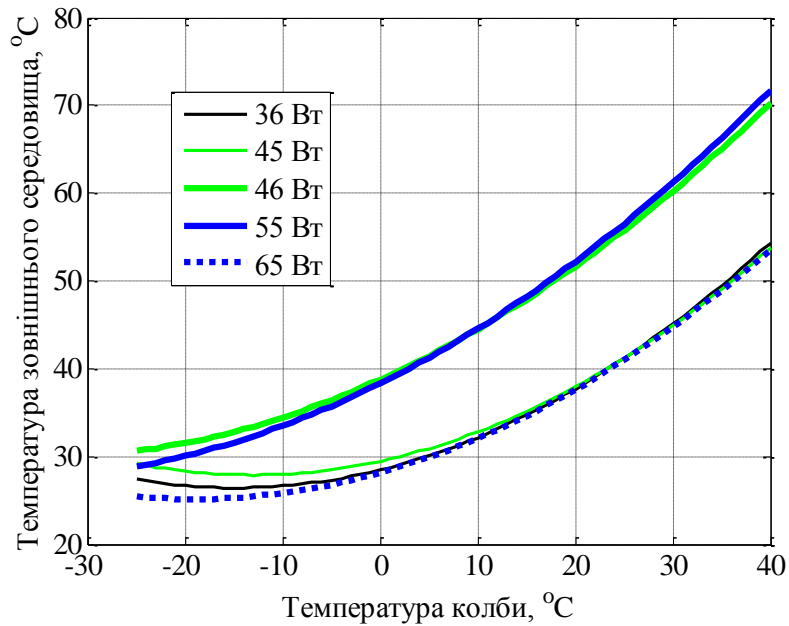


Рис. 4.16. Залежність температури в корпусі ЕПРА КЛЛ від температури зовнішнього середовища

На основі результатів досліджень проведено розробку комп'ютерної моделі теплового режиму СП із КЛЛ Realux 55 Вт. Для коректного моделювання теплового режиму було створено 3D модель КЛЛ. Для цього на першому етапі розроблено 3D моделі ЕПРА (рис. 4.17) та корпусу в якому він розміщувався (рис. 4.18). Це було реалізовано засобами 3D моделювання в програмі SolidWorks [111].



Рис. 4.17. 3D модель ЕПРА

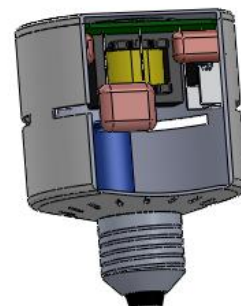


Рис. 4.18. 3D модель корпусу ЕПРА із вентиляційними отворами та цоколем

Даний макет створювався на основі ЕПРА КЛЛ Realux 55Вт (рис. 4.19). Методом спряження колба КЛЛ з'єднувалося із ЕПРА (рис. 4.20)

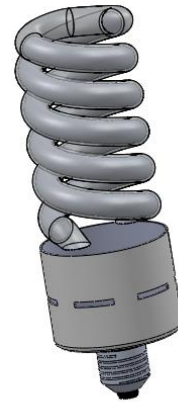
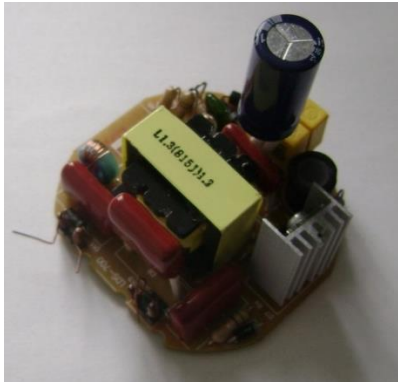


Рис. 4.19. ЕПРА для КЛЛ Realux 55 Вт

Рис. 4.20. 3D модель КЛЛ з ЕПРА

КЛЛ орієнтувалася відносно відбивача (рис. 4.21), при цьому вихідний отвір СП закривався розсіювачем.

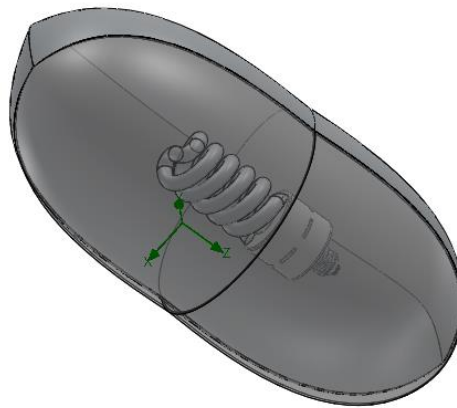


Рис. 4.21. Світловий прилад із КЛЛ

На основі експериментальних залежностей задавалися температурні режими колби лампи та ЕПРА. Із бази даних SolidWorks вибиралися матеріали для кожного елемента СП. Дослідження теплового режиму світильника проводили при температурі зовнішнього середовища -25°C та $+25^{\circ}\text{C}$. При цьому вказувалося оточуюче середовище – повітря і враховували конвекційні потоки та гравітацію. Після вводу всіх вхідних

даних та визначення граничних умов запускався процес розрахунку. На рис. 4.22 представлено розподіл температури всередині СП.

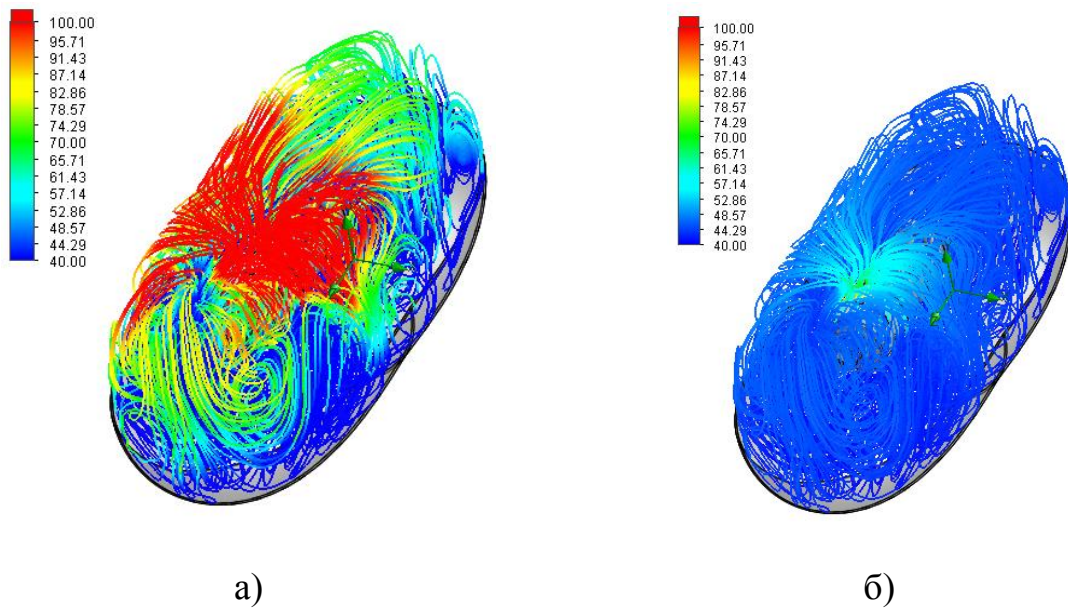


Рис. 4.22. Розподіл температури всередині СП при температурі зовнішнього середовища а) $+25^{\circ}\text{C}$; б) -25°C

Встановлено, що при розташуванні КЛЛ Realux 55 Вт в розрахованому СП, температура в корпусі ЕПРА зростає до $+55^{\circ}\text{C}$, що відповідає допустимій температурі (рис. 4.23).

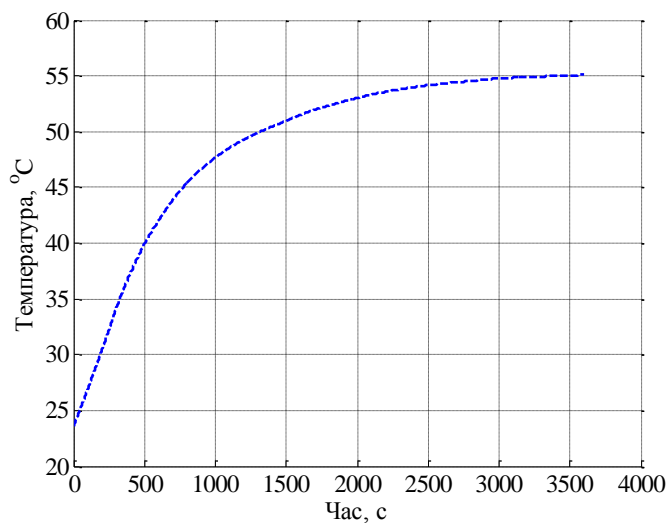


Рис. 4.23. Температура в корпусі ЕПРА при розташуванні КЛЛ в СП при температурі зовнішнього середовища $+25^{\circ}\text{C}$

Висновки до розділу:

1. Встановлено, що температура в корпусі ЕПРА при температурі зовнішнього середовища $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищує $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт. Час від моменту включення до стабілізації температури для досліджуваних КЛЛ не перевищував 40 хв.

2. Встановлено, що при розташуванні КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт в СП зовнішнього освітлення температура в корпусі ЕПРА не перевищує $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає допустимій температурі робочого режиму.

3. Встановлено, що температура повітря в СП при включенні КЛЛ не перевищує $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому світловий потік ламп знижувався в середньому на 5 – 6 %.

4. Встановлено, що при використанні КЛЛ в закритих СП при температурі зовнішнього середовища $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ їх світловий потік зменшується на 6 – 8 %.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ІЗ КОМПАКТНИМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИМИ ЛАМПАМИ

5.1. Дослідження гармонійного складу струму асортименту КЛЛ, представлених на ринку України

Лампи КЛЛ живляться від вбудованих в їх корпус вторинних джерел живлення, що являють собою нелінійне навантаження та є джерелом вищих гармонік струму. Для таких ДС запроваджено нормування щодо допустимого рівня емісії вищих гармонік струму в електричну мережу [113, 114].

Для джерел світла потужністю включно до 25 Вт нормовані значення приводяться у значеннях струму на одиницю споживаної потужності:

$$\sigma_k(P_{ДС} \leq 25 \text{ Вт}) = \frac{i_k}{P_{ДС}}, \quad (5.1)$$

де i_k – діюче значення струму k -ої гармоніки;

$P_{ДС}$ – потужність джерела світла

Для джерел світла потужністю понад 25 Вт нормовані значення приводяться у відсотках відносно сили вхідного струму основної частоти:

$$\sigma_k(P_{ДС} > 25 \text{ Вт}) = \frac{i_k}{i_1} 100\%. \quad (5.2)$$

Максимальні допустимі значення коефіцієнтів $\sigma_k(P_{DC} \leq 25 \text{ Вт})$ та $\sigma_k(P_{DC} > 25 \text{ Вт})$ приведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Значення граничних гармонійних складових споживаного струму для освітлювального устаткування згідно стандартів ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004 та EN 61000-3-2:2006

Порядок гармоніки			2	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Потужність	до 25 Вт	$\sigma_k(P_{DC} \leq 25 \text{ Вт}),$ А/Вт	-	3,4	1,9	1	0,5	0,35	0,3	0,26	0,23	0,2
	понад 25 Вт	$\sigma_k(P_{DC} > 25 \text{ Вт}),$ %	2	30·PF*	10	7	5	3	3	3	3	3

Продовження таблиці 5.1

Порядок гармоніки			21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
Потужність	до 25 Вт	$\sigma_k(P_{DC} \leq 25 \text{ Вт}),$ А/Вт	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10
	понад 25 Вт	$\sigma_k(P_{DC} > 25 \text{ Вт}),$ %	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Примітка. * PF – коефіцієнт потужності

Для аналізу спектрального складу струму та напруги КЛЛ проведено дослідження осцилограм струму та напруги. Для цього було розроблено установку, блок-схему якої наведено на рис. 5.1.

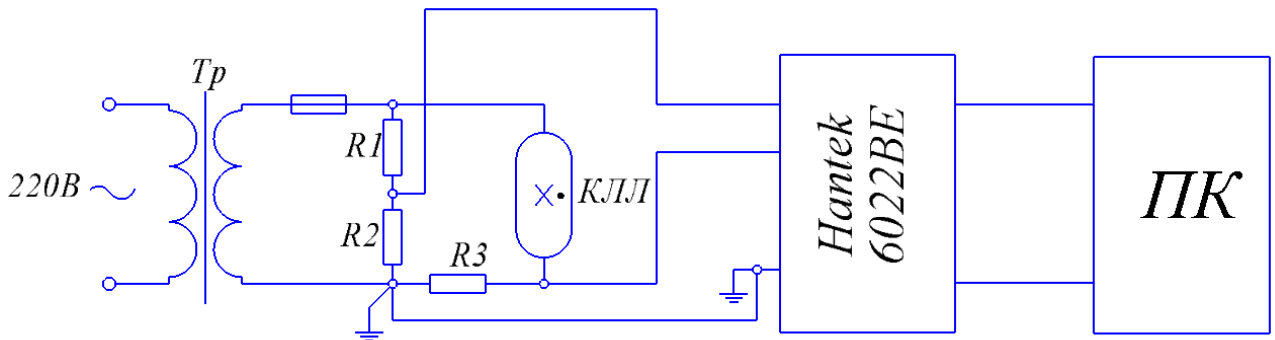


Рис. 5.1. Блок-схема установки для вимірювання осцилограм струму та напруги КЛЛ

Для візуалізації та збереження інформації використали комплект цифровий осцилограф Hantek-6022BE – комп'ютер ПК. Миттєві значення напруги та струму отримувалися у вигляді двох масивів даних з частотою дискретизації сигналу $f_{\text{д}} = 1$ МГц. Згідно теореми Котельникова [115] для того, щоб відновити сигнал на прийомі без втрат, необхідно, щоб частота дискретизації була хоча б у два рази більша за максимальну частоту вихідного сигналу. Більшість виробників вимірювальної техніки рекомендують:

$$\frac{f_{\text{д}}}{f_{\text{сигн}}} \geq 3, \quad (5.3)$$

де $f_{\text{сигн}}$ – частота вхідного сигналу.

Оскільки значення гармонійних складових нормуються до 39 гармоніки, то співвідношення (5.3) матиме значення

$$\frac{f_{\delta}}{f_{\text{сигн}}} = \frac{f_{\delta}}{kf_{\text{осн}}} = \frac{1 \cdot 10^6}{40 \cdot 50} = 500 \gg 3, \quad (5.4)$$

де $f_{\text{осн}}$ – частота основної гармоніки ($f_{\text{осн}} = 50$ Гц)

Отже, частоти дискретизації вхідного сигналу за допомогою даного осцилографа більше, ніж достатньо для проведення дослідження.

Для проведення Фур'є аналізу осцилограм струму було розроблено програму в середовищі Matlab. Алгоритм програми наступний:

1. Зчитування масивів даних напруги і струму та побудова їх графіків;

2. Задання частоти дискретизації сигналу f_{δ} , кількості гармонік k та визначення частоти основної гармоніки $f_{\text{осн}}$;

3. Розрахунок синусної та косинусної складових струму та напруги за формулами [116]:

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n [s_p(\omega t) \sin_p(k\omega t)], \quad (5.5)$$

$$C_k = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n [s_p(\omega t) \cos_p(k\omega t)], \quad (5.6)$$

де B_k , C_k – амплітуда синусної та косинусної складових k -ої гармоніки відповідно;

n – кількість отриманих значень функції $s_p(\omega t)$, що описує миттєві значення струму або напруги КЛЛ;

4. Знаходження амплітуди кожної гармоніки за формулами:

$$S_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n [s_p(\omega t)], \quad (5.7)$$

$$S_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}, \quad (5.8)$$

де S_0 – значення нульової гармонічної складової функції $s_p(\omega t)$;

S_k – значення амплітуди k -ої гармонічної.

За допомогою даної вимірювальної схеми були проведені дослідження та перевірка на відповідність стандартам гармонійних складових струму та напруги для енергозберігаючих КЛЛ виробництва фірм АскоУкрЕм, Ecomur, Vitoone, Realux, Maxus, Global, «OSRAM», «Іскра», «Наша сила» потужністю від 11 до 85 Вт. При цьому бралось по п'ять зразків ДС кожної потужності і кожного типу.

Приклади отриманих осцилограм споживаної напруги та струму наведені на рис. 5.2.

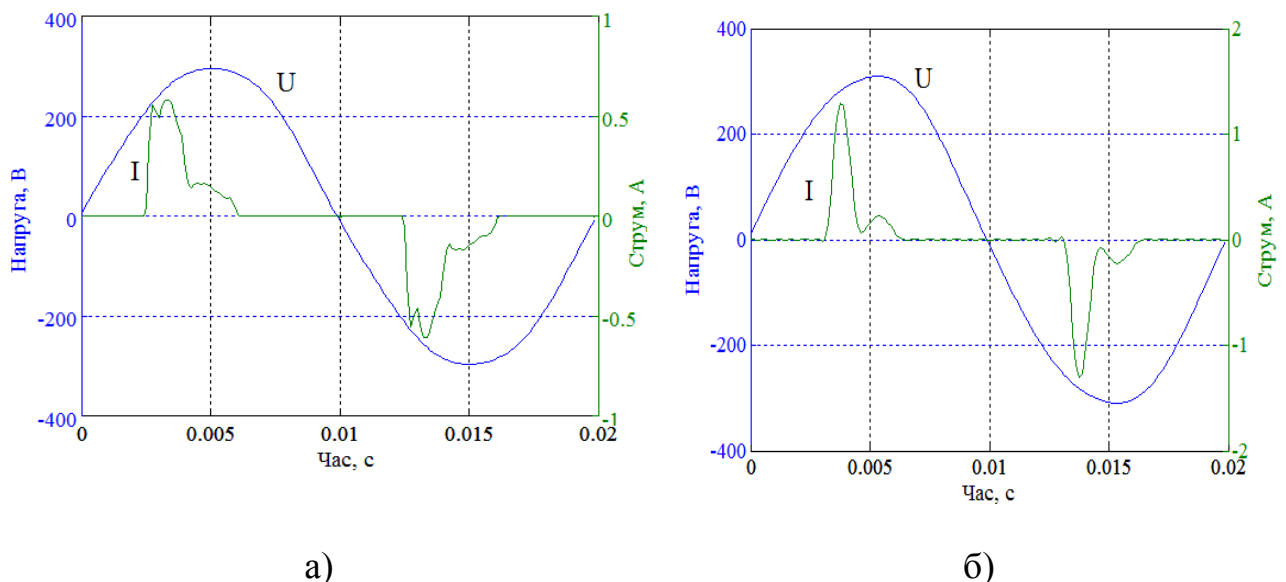
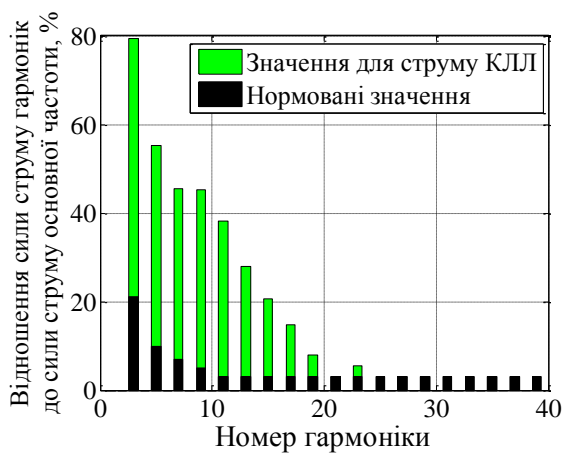


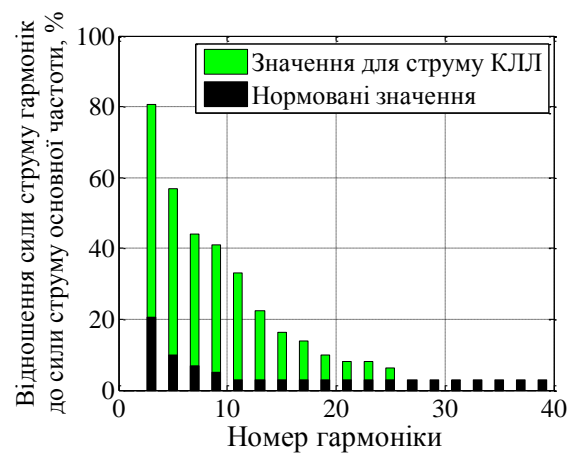
Рис. 5.2. Типові осцилограми струму на напруги КЛЛ: а) потужністю до 25Вт;
б) потужністю більше 25Вт

Як бачимо із вище наведених осцилограм споживаний струм КЛЛ сильно відрізняється від синусоїди та має піковий характер, при цьому для всіх досліджуваних КЛЛ потужністю до 25Вт вершина піку струму дещо спотворена (рис. 5.2, а).

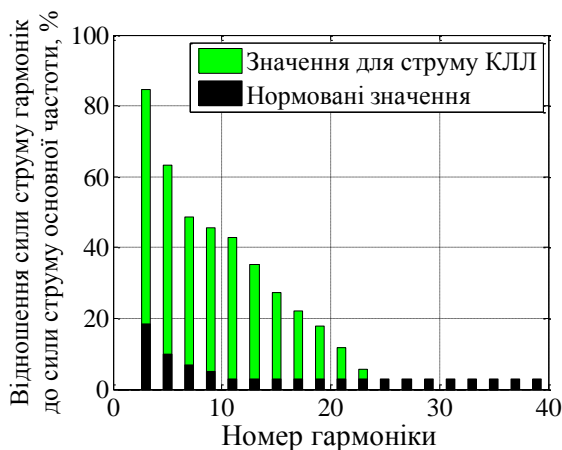
Після проведення порівняльного аналізу на відповідність вимогам стандартів встановлено, що у досліджуваних КЛЛ, амплітудні значення вищих гармонік перевищують нормовані значення (рис. 5.3).



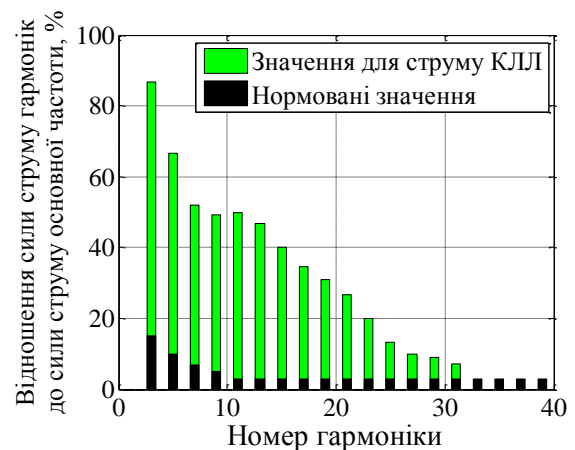
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.3. Відношення сили струму гармонік до сили струму основної частоти в порівнянні із нормованими значеннями для КЛЛ а) Realux 55 Вт, б) Maxsus 55 Вт, в) Global 46 Вт, г) Realux 36 Вт

Для досліджуваних джерел світла було проведено розрахунок коефіцієнта спотворення та коефіцієнта гармонік струму [117].

Коефіцієнт спотворення струму розраховували за формулою:

$$K_{НС} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_k^2 + \dots}{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2 + \dots}} 100\% , \quad (5.9)$$

де I_k - амплітудне значення k -ої гармоніки.

Коефіцієнт гармонік струму розраховували за формулою:

$$K_{Г} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_k^2 + \dots}}{I_1} 100\% . \quad (5.10)$$

Отриманні результати розрахунків наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Розрахункові значення коефіцієнта спотворення та коефіцієнта гармонік досліджуваних КЛЛ

Джерело світла	Коефіцієнт спотворення $K_{НС}$, %	Коефіцієнт гармонік $K_{Г}$, %
1	2	3
АскоУкрЕм 15Вт	79,9	133,03
АскоУкрЕм 20Вт	78,7	126,6
АскоУкрЕм 26Вт	76,2	117,5
Есоnug 11Вт	72,2	104,2

Продовження таблиці 5.2

1	2	3
Econur 15Вт	74,8	112,7
Econur 18Вт	74,1	110,2
Econur 20Вт	77,1	120,9
Econur 25Вт	77,2	121,5
Econur 35Вт	84,8	159,8
Econur 65Вт	83,7	152,6
Econur 85Вт	81,3	139,4
Vitoone 15Вт	75,3	114,6
Vitoone 18Вт	77,9	124,02
Vitoone 21Вт	77,6	123,05
Vitoone 24Вт	75,65	115,7
Realux 36Вт	85,4	164,5
Realux 55Вт	78,9	128,3
Global 46Вт	81,9	142,9
Maxus 55Вт	78,1	125,2

Як бачимо із отриманих даних наявність пасивного коректора коефіцієнта потужності в схемах ЕПРА досліджуваних КЛЛ не забезпечує відповідність нормованим показникам коефіцієнта спотворення та коефіцієнта гармонік [112]. Це призводить до додаткових втрат електроенергії в мережі живлення від вищих гармонік.

5.2. Облік електричної енергії, спожитої ОУ з КЛЛ в системах зовнішнього освітлення

Лічильники активної електричної енергії проводять її облік, виходячи з припущення, що вміст вищих гармонік напруги мережі не перевищує 1%, а амплітуда вищих гармонік струму мережі не перевищує 10% від амплітуди основної гармоніки [118]. На цьому ґрунтуються вибір приладів реєстрації струму і напруги та алгоритму обліку електроенергії. Очевидно, що похибка лічильника в умовах впливу несинусоїдних струмів і напруг, буде відрізнятися від допустимої [104]. Таким чином точність показань лічильників електроенергії істотно залежить від якості вимірюваної енергії. Враховуючи, що КЛЛ є джерелами вищих гармонік, то актуальним є дослідження впливу електричних параметрів енергоощадних джерел світла на похибку обліку електроенергії.

Відносна похибка лічильника визначається за формулою [104]:

$$\delta = \frac{W - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad (5.11)$$

де W – енергія згідно показів досліджуваного лічильника;

W_0 – енергія згідно показів зразкового лічильника.

Для вимірювання електричної енергії використовували індукційний лічильник Росток СО–5000 та електронний «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД.

Згідно із (5.11) можна записати вираз для визначення відносних похибок для індукційного δ_i та електронного δ_e лічильників, відповідно:

$$\delta_i = \frac{W_i - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

$$\delta_e = \frac{W_e - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad (5.13)$$

де W_i – енергія згідно показів індукційного лічильника;

W_e – енергія згідно показів електронного лічильника.

W_i та W_e визначали із параметрів C_i та C_e лічильників, які показують за яку кількість обертів диска індукційного лічильника та спалахів світлодіода «облік» електронного лічильника система споживе 1 кВт·год енергії. Для індукційного лічильника Росток СО–5000 $C_i = 250$ об/(кВт·год). Тоді значення енергії w_i , виміряної даним лічильником за один оберт диска, буде дорівнювати

$$w_i = \frac{3,6 \cdot 10^6}{250} = 14400 \text{ (Вт·с)}, \quad (5.14)$$

За n обертів лампа споживає:

$$W_i = w_i n = 14400n \text{ (Вт·с)}. \quad (5.15)$$

Для лічильника «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД $C_e = 3200$ імп./(кВт·год). Тоді навантаження за проміжок часу між спалахами Δt споживає енергію w_e , яка визначається за формулою

$$w_e = \frac{3,6 \cdot 10^6}{3200} = 1125 \text{ (Вт·с)}. \quad (5.16)$$

Принцип роботи електронного лічильника базується на перемножуванні сигналів, які пропорційні струму і напрузі в мережі та перетворенні результату перемноження в імпульси, частота слідування яких пропорційна активній потужності, споживаної навантаженням. Облік отриманих імпульсів здійснюється за допомогою відлікового пристрою.

Перемноження сигналів пропорційних струму і напрузі проводиться методом широтно-імпульсної модуляції. Всі операції по перетворенні цих сигналів в імпульси, частота слідування яких пропорційна активної потужності, виконується за допомогою спеціальних інтегральних мікросхем – перетворювача активної потужності в частоту. Ця частота дорівнює частоті спалахів світлодіода «облік» електронного лічильника, яка реєструвалося на персональному комп'ютері ПК через пристрій узгодження сигналу УС.

Тоді за N спалахів світлодіода «облік» лампа споживає:

$$W_e = w_e(N - 1) = 1125(N - 1) \text{ (Вт}\cdot\text{с)}. \quad (5.17)$$

W_0 визначали із осцилограм струму та напруги досліджуваних джерел світла з виразу

$$W_0 = P_0 t. \quad (5.18)$$

Вимірювання потужності навантаження P_0 досліджуваних ДС проводилися на установці рис. 5.4.

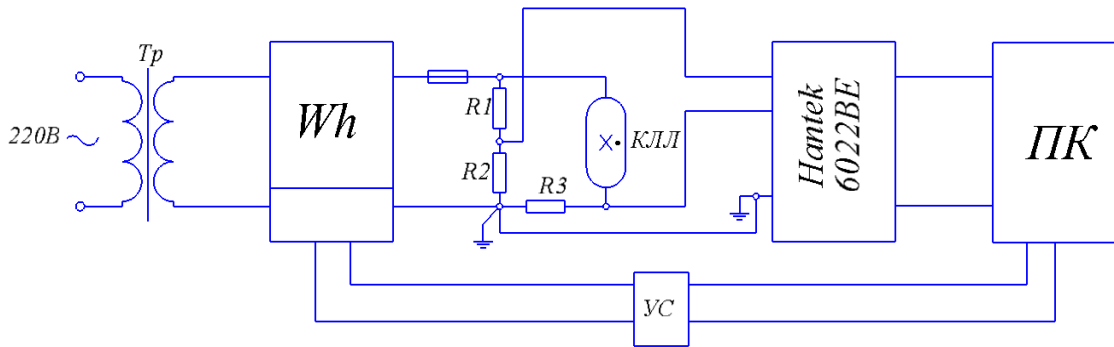


Рис. 5.4. Блок–схема установки для вимірювання осцилограм струму, напруги та потужності енергоощадних джерел світла.

Джерело світла ДС живилося від мережі змінної напруги $220В$ через трансформатор Tr , що служив гальванічною розв'язкою між мережею та KLL . У вторинну обмотку трансформатора під'єднувався лічильник Wh та KLL .

При розрахунку потужності P_0 для того, щоб уникнути впливу нестабільності параметрів мережі, запис осцилограм проводився із інтервалом в 5 секунд протягом часу спостереження t . Визначення потужності P_{0j} для j -го спостереження проводили за формулою

$$P_{0j} = U_{1j} I_{1j} \cos(\varphi_{1j}), \quad (5.19)$$

де φ_{1j} – кут зсуву фаз між діючим значення напруги U_{1j} та струму I_{1j} першої гармоніки для j -го спостереження. Ці значення дорівнюють:

$$U_{1j} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}, \quad (5.21)$$

$$I_{1j} = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}. \quad (5.22)$$

Потужність P_0 визначалася за формулою

$$P_0 = \frac{\sum_j P_{0j}}{j}. \quad (5.22)$$

Коефіцієнт потужності PF , враховуючи рівняння (5.19)–(5.21), визначався за формулою:

$$PF = \frac{P_0}{S} = \frac{I_{1m} \cos \varphi_1}{\sqrt{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2 + \dots + I_{km}^2}}. \quad (5.23)$$

де I_{km} – амплітудне значення k -ої гармоніки струму.

Методика вимірювання відносної похибки лічильників активної електричної енергії при обліку спожитої енергії КЛЛ складається з таких етапів:

1) вимірюємо кількість обертів n диска індукційного лічильника та кількості спалахів N світлодіода «облік» електронного лічильника за час спостереження t при їх навантаженні досліджуваними джерелами світла;

2) за час спостереження t проводимо запис осцилограм струму та напруги джерел світла із інтервалом в 10 секунд та розраховуємо P_{0j} згідно (5.19);

3) проводимо розрахунок потужності P_0 згідно (5.22);

4) за формулами (5.15), (5.17), (5.18) та (5.23) проводимо розрахунок енергій W_i , W_e , W_0 та PF ;

5) розрахунок відносної похибки δ_i та δ_e для індукційного та електронного лічильників проводимо за формулами (5.12), (5.13), відповідно.

Результати розрахунків відносної похибки δ_i , δ_e лічильників за вище приведеною методикою та розрахунок коефіцієнта потужності PF представлено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

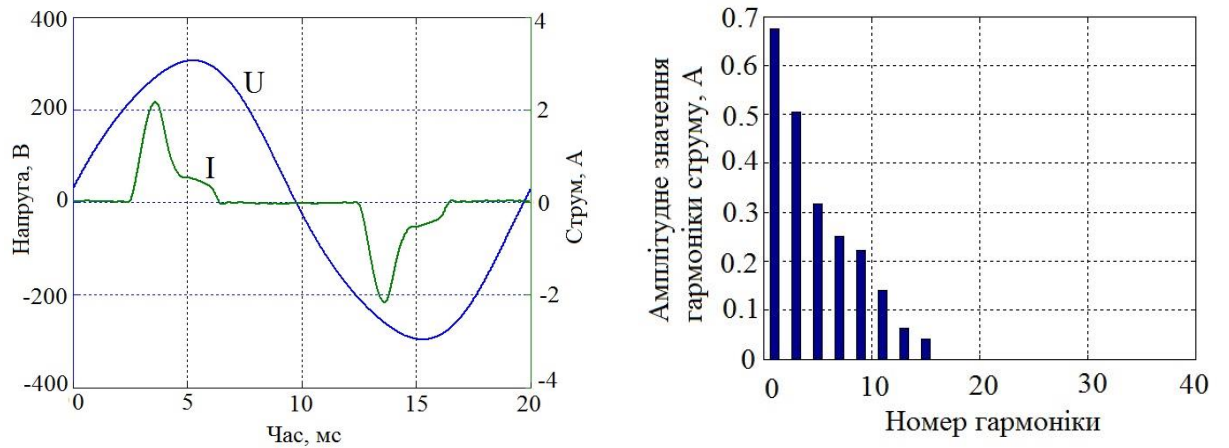
Відносна похибка лічильників Росток СО–5000 та «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД при обліку спожитої електричної енергії КЛЛ

Тип джерела світла	PF	δ_i , %	δ_e , %
Realux 55 Вт	0,3514	8,01	6,07
Maxsus 55 Вт	0,3442	7,97	5,13
Global 46 Вт	0,3067	8,55	5,75
Realux 36 Вт	0,249	17,7	6,18

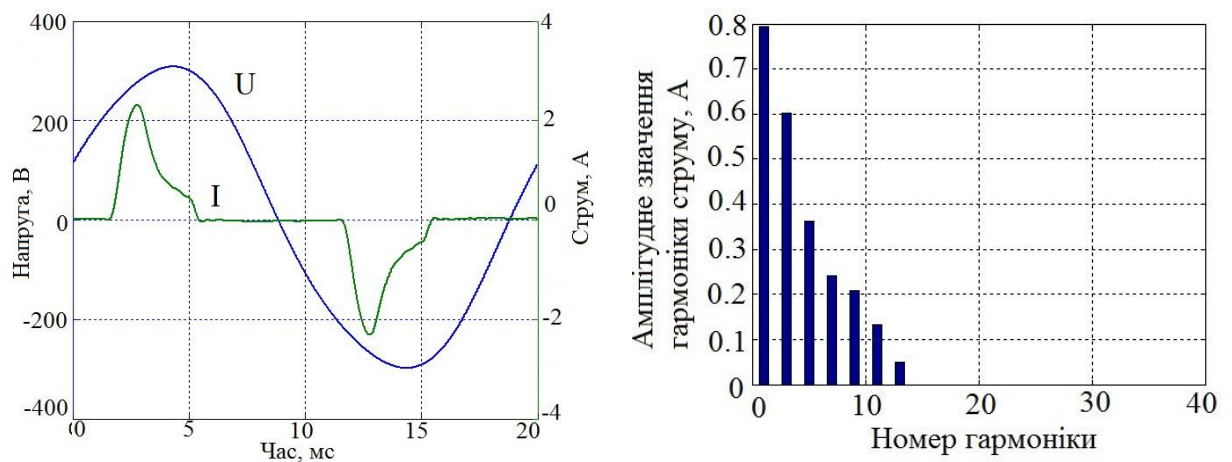
Згідно паспортних даних для лічильника Росток СО–5000 максимальна допустима похибка складає 2,5 %, при значенні струму 5 % від номінального ($I_{ном} = 10A$). Найбільша похибка лічильника виявлена для лампи Realux 36 Вт і складає 17,7 %. Ця похибка зумовлена невідповідністю гармонійного складу струму досліджуваних КЛЛ нормованим значенням.

Для електронного лічильника «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД похибка обліку електроенергії коливається у межах від 4 до 8%, при цьому допустима похибка складає 1% при мінімальній чутливості 20мА. Аналогічно із індукційним лічильником в електронного лічильника максимальна похибка є для лампи Realux 36 Вт і складає 6,18%.

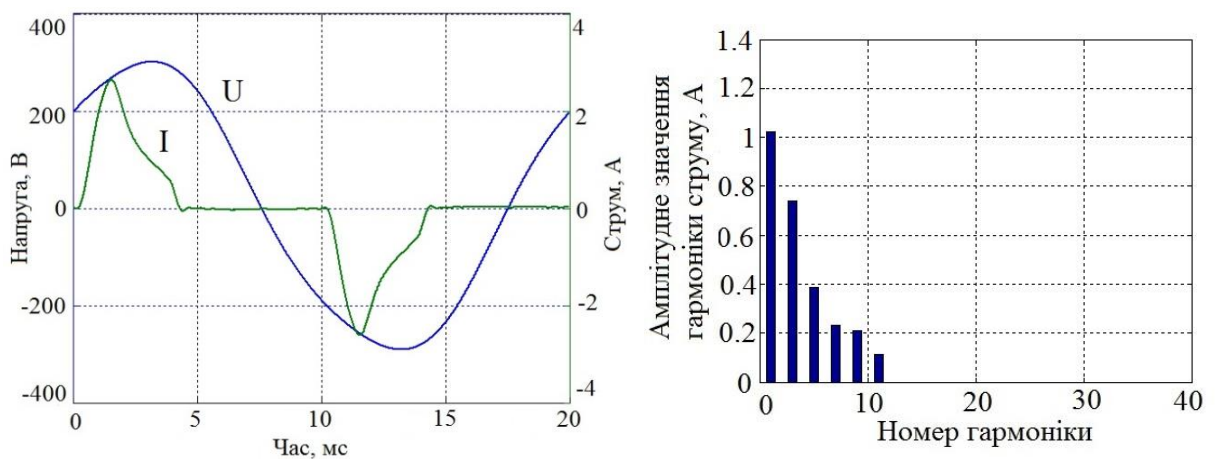
Однією із причин, що зумовлює високе значення похибки індукційного лічильників, є низьке значення робочого струму ламп. Для збільшення струму лічильників проведено дослідження їх похибок із декількома лампами, включеними одночасно. Осцилограми струму, напруги та гармонійний склад струму при одночасному включенні декількох ламп приведено на рис. 5.5.



а)



б)



в)

Рис. 5.5. Осцилограми струму, напруги та гармонійний склад струму для ламп а) Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт; б) Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт, Realux 36 Вт; в) Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт Realux 36 Вт, та Global 46 Вт

Результати розрахунків відносної похибки лічильників із декількома лампами, включеними одночасно, представлено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Відносна похибка лічильників Росток СО–5000 та «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД при обліку спожитої електричної енергії декількома КЛЛ

Тип джерела світла	PF	$\delta_i, \%$	$\delta_e, \%$
Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт	0,4339	5,45	5,09
Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт та Realux 36 Вт	0,4634	4,91	4,72
Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт та Global 46 Вт	0,5162	4,25	4,53

Як бачимо із даних табл. 4.4, похибка електронного лічильника «МЕРИДІАН» СОЭ–1.02/5КРТД є в середньому в 2,5 рази менша похибки індукційного лічильника Росток СО–5000.

При зростанні потужності за рахунок включення декількох ДС похибка досліджуваних лічильників знижується (табл. 5.4). Тому високе значення похибки індукційного лічильника в першому випадку зумовлене низьким робочим струмом лампи. Тим не менше похибка лічильників залишається більшою за допустиму.

На рис. 5.6 представлено гістограму залежності похибок індукційного та електронного лічильника від коефіцієнта потужності. Встановлено, що при зростанні коефіцієнта потужності похибки досліджуваних лічильників зменшуються.

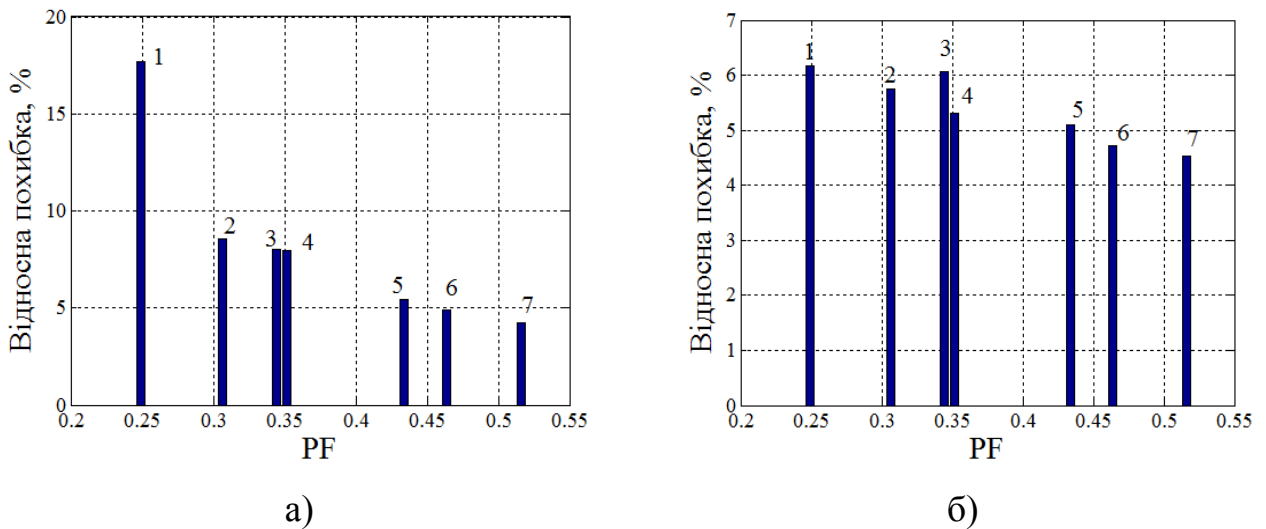


Рис. 5.6. Гістограма залежності похибки а) індукційного лічильника, б) електронного лічильника від PF при обліку спожитої електроенергії КЛЛ: 1 – Realux 36 Вт; 2 – Global 46 Вт; 3 – Maxsus 55 Вт; 4 – Realux 55 Вт; 5 – Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт; 6 – Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт; 7 – Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт та Global 46 Вт

При включенні в коло двох і більше ламп різної потужності та різних фірм виробників спостерігається тенденція до зниження значень амплітуди вищих гармонік (див. рис. 5.5) та збільшення значення PF (див. табл. 5.4).

Оскільки осцилограми струмів для досліджуваних КЛЛ симетричні відносно осі абсцис, то розклад їх в ряд Фур'є має вигляд:

$$i(t) = \sum_{k=1}^q \left[I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right], \quad (5.24)$$

де k – непарні числа;

ψ_k – початкова фаза k -ої гармоніки, яка розраховувалась за формулою:

$$\psi_k = \arctan \frac{C_k}{B_k}, \quad (5.25)$$

де B_k і C_k розраховані згідно (5.5, 5.6), відповідно.

При паралельному включенні одночасно двох ламп загальний струм, що буде протікати в колі, визначається за формулою:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) = \sum_{k=1}^q \left[I_{1km} \sin(k\omega t + \psi_{1k}) + I_{2km} \sin(k\omega t + \psi_{2k}) \right], \quad (5.26)$$

де $i_1(t)$, $i_2(t)$ – миттєві значення струмів;

ψ_{1k} , ψ_{2k} – початкові фази струмів k -ої гармоніки;

I_{1km} , I_{2km} – амплітудні значення струмів k -ої гармоніки.

За розрахунковими значеннями ψ_k проведено побудову фазового спектру струму живлення досліджуваних КЛЛ (рис. 5.8).

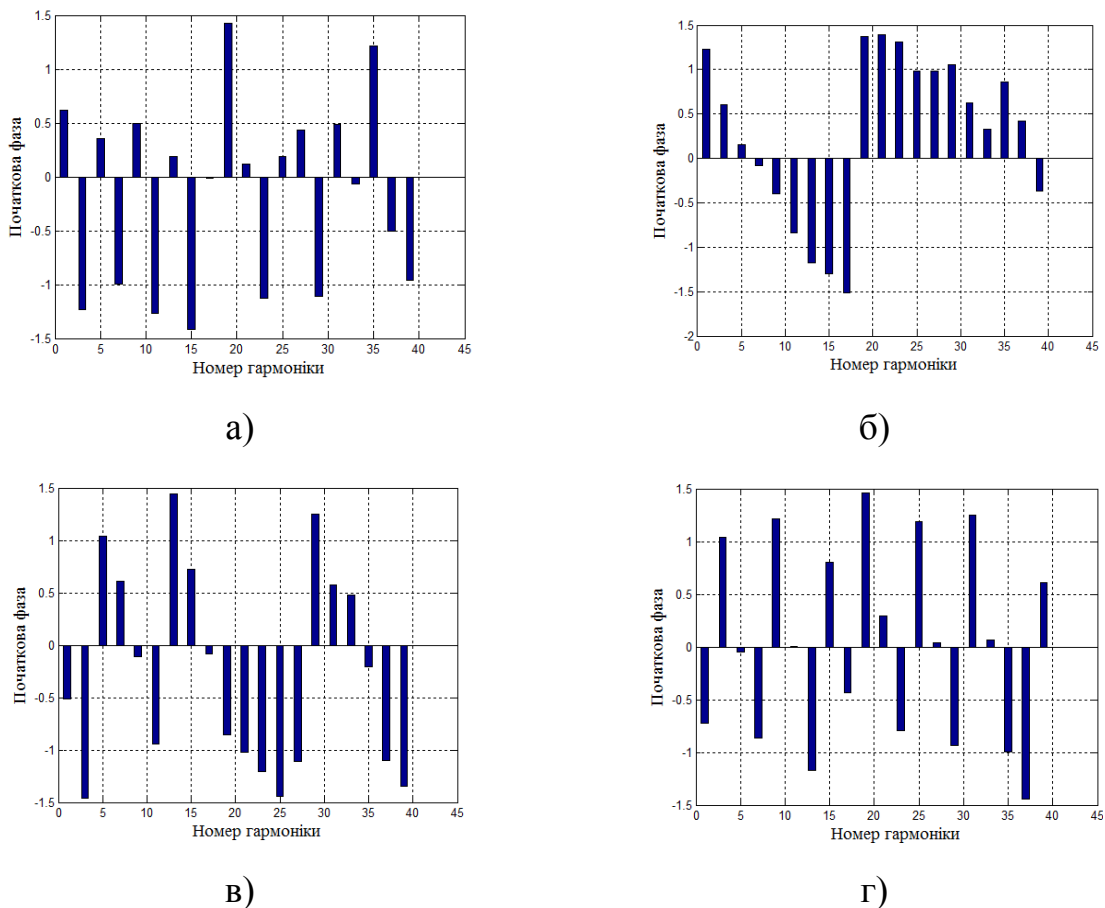
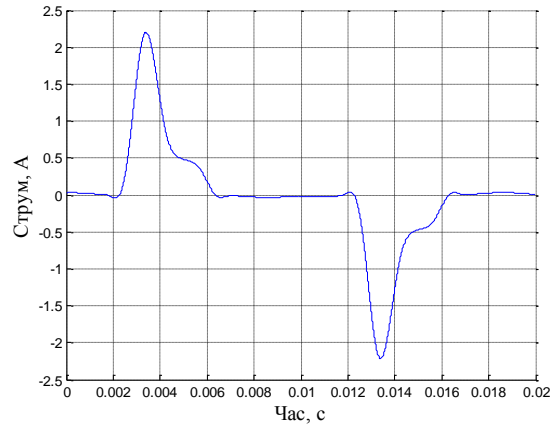


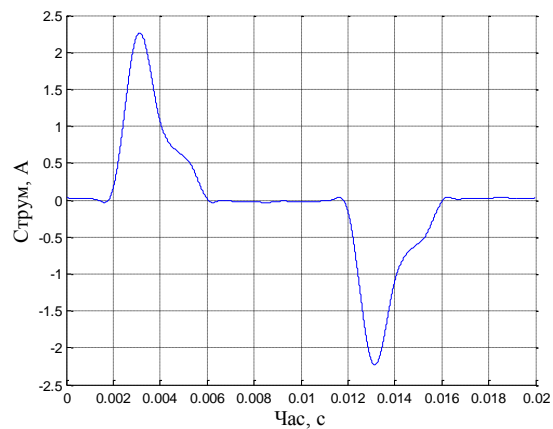
Рис. 5.8. Фазовий спектр струму живлення для ламп:

а) Realux 55 Вт, б) Maxsus 55 Вт, в) Global 46 Вт, г) Realux 36 Вт .

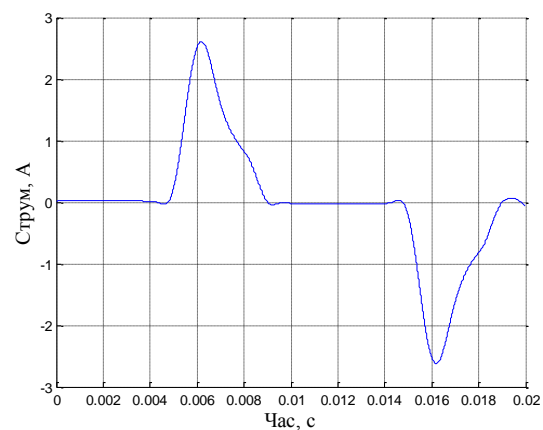
За формулою (5.26) проведено визначення осцилограм струму живлення КЛЛ при одночасному включенні декількох ламп (рис. 5.9). Як бачимо, ці осцилограми ідентичні осцилограмам на рис. 5.5.



а)



б)



в)

Рис. 5.9. Розрахункові осцилограми струму при одночасному включенні ламп а) Maxsus 55 Вт та Realux 55 Вт; б) Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт та Realux 36 Вт; в) Maxsus 55 Вт, Realux 55 Вт, Realux 36 Вт та Global 46 Вт

Висновки до розділу:

1. Проведено дослідження впливу КЛЛ на показники якості електроенергії. Встановлено, що у КЛЛ, які присутні на ринку України, амплітудні значення вищих гармонік перевищують нормовані у 3-5 разів. Це зумовлено тим, що в схемах ЕПРА використовується лише пасивний коректор коефіцієнта потужності.

2. Удосконалено методику визначення відносної похибки індукційних та електронних лічильників та проведено аналіз впливу гармонійного складу струму КЛЛ на її величину. Встановлено, що похибки індукційного та електронного лічильників при обліку електроенергії в колах із КЛЛ перевищують максимально допустиму похибку на 3 та 4 %, відповідно.

ВИСНОВКИ

1. Для СП зовнішнього освітлення ГКУ11У, ЖКУ11У, РКУ11У та ЖКУ, РКУ Helios 21 проведено дослідження світлотехнічних параметрів із нетиповими для них ДС та встановлено, що при використанні КЛЛ в даних СП їх ККД зменшується на 14...17 % внаслідок екранування світлового потоку поверхнею світного тіла.

2. Розроблено математичну модель для розрахунку фотометричного тіла СП вуличного освітлення, що забезпечує необхідні нормативні показники освітлення поверхні дорожнього покриття.

3. Розроблено методику розрахунку СП для зовнішнього освітлення із КЛЛ, яка дозволяє враховувати геометричні розміри ДС та на її основі розраховано відбивач СП із КЛЛ Realux 55 Вт, який спрямовує світловий потік повз поверхню світного тіла, за рахунок чого ККД світильника зріс на 26 %.

4. Проведено аналіз світлотехнічних параметрів СП для вуличного освітлення із КЛЛ при зміні геометричних розмірів її світного тіла. Встановлено зв'язок між допустимими розмірами світного тіла КЛЛ, її потужністю та світлотехнічними параметрами СП.

5. Побудовано математичну модель освітлення для різних категорій вулиць, яка дозволяє визначати направленість та розташування СП залежно від нормативних вимог. На її підставі проведено розрахунок якісних та кількісних показників освітлення дорожнього покриття при використанні СП із КЛЛ Realux 55 Вт. Встановлено, що максимальна допустима відстань між опорами для категорій вулиць М4 та М5 складає 37 м, а для категорії М3 – 33 м, найкращий кут нахилу оптичної осі СП до вертикалі складає 31° .

6. На основі результатів експериментальних досліджень теплового режиму КЛЛ встановлено, що температура в корпусі ЕПРА при температурі навколишнього середовища $+25^\circ\text{C}$ не перевищує $+40^\circ\text{C}$ для КЛЛ потужністю від 36 до 65 Вт. Час виходу на усталений температурний режим складає не більше 40 хв. При розташуванні КЛЛ в СП для зовнішнього освітлення

температура в корпусі ЕПРА зростає до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає допустимій робочій температурі.

7. Проведено дослідження впливу КЛЛ на показники якості електроенергії. Встановлено, що у КЛЛ, які присутні на ринку України, амплітудні значення вищих гармонік перевищують нормовані у 3-5 разів. Це зумовлено тим, що в схемах ЕПРА використовується лише пасивний коректор коефіцієнта потужності.

8. Удосконалено методику визначення відносної похибки індукційних та електронних лічильників та проведено аналіз впливу гармонійного складу струму КЛЛ на її величину. Встановлено, що похибки індукційного та електронного лічильників при обліку електроенергії в колах із КЛЛ перевищують максимально допустиму похибку на 3 та 4 %, відповідно.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андрійчук В.А. Аналіз систем зовнішнього освітлення та шляхів підвищення їх ефективності / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 68. – №4. – С.168–175. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).
2. Поталіцин С. Ю. Світлотехнічні системи зовнішнього освітлення та аналіз їх енергетичної ефективності / С.Ю. Поталіцин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 49–57.
3. Андрійчук В.А. Аналіз енергетичної ефективності установок зовнішнього освітлення / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Комунальне господарство міст. – 2015. – №1(118). – С. 7–11.
4. Андрійчук В.А. Особливості організації освітлювальних систем в умовах міського господарства та шляхи підвищення їх ефективності / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Галицький економічний вісник. – 2013. – №2(41). – С. 55–62. – (загальні проблеми економіки та суб'єктів господарювання).
5. Аналіз стану сфери зовнішнього освітлення за 2011 рік [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2012. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.
6. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні у 2012 році [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2013. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.
7. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні у 2013 році [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку,

будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2014. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

8. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні у 2014 році [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2014. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

9. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні у 2015 році [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2016. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

10. Аналіз стану сфери дорожньо–мостового господарства за 2012 рік [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2016. Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

11. Аналіз стану сфери дорожньо–мостового господарства за 2012 рік [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2013 Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

12. Аналіз стану сфери дорожньо–мостового господарства за 2012 рік [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2013 Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

13. Аналіз стану сфери дорожньо–мостового господарства за 2012 рік [Електронний ресурс]: за даними Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України// Мережевий вісник – 2013 Режим доступу до журн.: <http://minregion.gov.ua>.

14. Андрійчук В.А. Фотометрія зовнішнього освітлення / В.А. Андрійчук, Я.М. Осадца, С.Ю. Поталіцин // Світлолюкс. – 2011. – №5 – С. 58–62.
15. Программа освещения дорог, улиц, дворов, мест общественного пользования «Светлая Украина» [Электронный ресурс]: за даними Центра проектних досліджень «Рівень життя» Мережевий вісник – 2016 Режим доступу до журн.: <http://livingok.org/>
16. Соціально економічне становище сільських населених пунктів України : Стат. зб. – К.: Держкомстат України, 2006.– 207 с.
17. Рейцен Е.А. Влияние наружного освещения на безопасность дорожного движения / Е.А. Рейцен, О.Л. Гончар // Містобудування та територіальне планування. – 2001. – № 9. – С. 200–228.
18. Трёмбач В. В. Световые приборы. 2–е изд., перераб. и доп. /В.В. Трёмбач// М.: Высшая школа. – 1990. С.463.
19. В. Weis. Berechnung von Spiegelreflektoren / Weis В. // Optik. – 1978. – № 5, с. 371–390.
20. Куц О.К. Уравнение фигур светлых точек и изображение источника света / О.К. Куц // Светотехника.–1966. –№3. – с. 24–26.
21. Куц О. К. Аналитические методы расчета коэффициента заполнения / О.К. Куц // Светотехника. –1967.–N 12.– с. 10–13.
22. Болдырев Н.Г. О расчете несимметричных зеркальных арматур (кососветов)//Светотехника.–1932. – № 7. – с.7–8.
23. Комиссаров В.Д. Основы расчета зеркальных и призматических отражательных арматур / Комиссаров В.Д. // Труды ВЭИ. – 1941. – № 43. – с. 5–59.
24. Schruben J.S. Formulation of Reflector Design Problem for a Lighting Fixture / J.S. Schruben // J. Opt. Soc. Am. – 1972. – №12(62). – P. 1498–1501.

25. Schruben J.S. Analysis of Rotationally Symmetric Reflectors for Illuminating Systems. / J.S. Schruben // J. Opt. Soc. Am. – 1974. – №11(64). – P. 55–58.
26. Keller J.B. The Inverse Scattering Problem in Geometrical Optics and the Design of Reflectors / J.B. Keller // IRE Transactions on Antennas and Propagation. Ap. – 1959. – №2. – P. 146–149.
27. Кинбер Б.Е. Решение обратной задачи геометрической акустики / Б.Е. Кинбер // Акустический журнал. – 1955. № 3 – с. 221–225.
28. Wolber. Berechnung von Reflectoren fuer beliebige Lichtverteilung / Wolber // Lichttechnik, 22.– 1970. – №12. – P.597–598.
29. Карякин Н. А. Световые приборы прожекторного и проекторного типов (теория и расчет) / Н.А. Карякин // М.: Высшая школа. – 1966. – 408 с.
30. Petry K. Beleuchtungsstarkeberechnung fur ausgedehnte Lichtquellen und ideale Spiegelreflektoren / K. Petry, B. Weis, A. Willing. // Licht-Forschung. – 1981. – №2. – P. 89–95.
31. Куц О.К. Расчет светораспределения зеркальных симметричных поверхностей с протяженными источниками света на ЭВМ / О.К. Куц, А.И. Митин // Светотехника. – 1976. – №3. – С. 5–8.
32. Гавриленков В.А. Расчет на ЭВМ кривых силы света параболоидного отражателя с цилиндрическим светящим телом / В.А. Гавриленков, М.Ф. Смолянский, В.В.Трембач // Светотехника.– 1982.–N 3.– С. 15–16.
33. Mazur J. Oblicanie odblisnikow zwierciadlany samochodnowych proektorow oswietleniowych metoda odbie elementarnych / J. Mazur, W. Zagan // Arch.Elektrotechniki. – 1983. – №34, P. 684–696.
34. Куц О. К. Аналитический расчет зеркальных симметричных светильников методом обратного луча / О. К. Куц, Н.В. Рохлина // Светотехника. – 1984. – № 3. – С. 7–18.

35. Muigg P. Computeruht rstuetze Reflektorberechnung / P. Muigg // Licht. – 1985. – № 7. – P. 475–478.
36. Фам Тхи Кам Бинь. Разработка методик светотехнического расчета световых приборов с унифицированными зеркальными отражателями / Бинь Фам Тхи Кам // Автореф. дис. канд. техн. наук. М. - 1992.
37. Софронов Н.Н. О яркости горелок металлогалогенных ламп / Н.Н. Софронов // Светотехника. – 1988. – №12. – С. 4–7.
38. Mazur Jw. Auto motive headlamps: Calculation of light distribution. / Jw. Mazur, R. Rosk. // Light.Res.Technol. – 1995. – №27(2). – P. 65–69.
39. Ищенко Е.Ф. Автоматизированное проектирование светооптических систем / Е.Ф. Ищенко, Н.В. Жиленкова, А.В. Буров // Светотехника. – 1992. – №7. – С. 5-8.
40. Гершун, А.А. Векторный метод расчёта симметричных зеркальных осветительных колпаков / А.А. Гершун, Н.Г. Болдырев // Светотехника. – 1936. – №1. С. 7 – 24.
41. Гершун, А. А. Световое поле / А.А Гершун // ОНТИ М.–Л.: – 1936. – 180 с.
42. Jolley, L.B.W. The theory and design of illuminating engineering equipment / L. B. W. Jolley, J. M. Waldram, G. H. Wilson // London: Chapman & Hall. – 1930. – P. 709.
43. Elmer, W.B. The optical design of reflectors, 2d ed. / W.B. Elmer // New York: Wiley. – 1980. – P. 290.
44. Olikier, V.I. Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics / V.I. Olikier // Trends in Nonlinear Analysis. – 2002. – P. 191–222.
45. Ries, H. Tailored freeform optical surfaces / H. Ries, J. Muschaweck // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – №19(3). – P. 590–595.

46. Parkyn, W.A. Segmented illumination lenses for step lighting and wall washing / W.A. Parkyn // *Current Developments in Optical Design and Optical Engineering*. – 1999. – N VIII. – pp. 363–370.
47. Ding, Y. Freeform LED lens for uniform illumination / Y. Ding, X. Liu, Z. R. Zheng, P. F. Gu // *Opt. Express*. – 2008. – №16(17).
48. Wang, L. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance / L. Wang, K. Qian, and Y. Luo // *Appl. Opt.* – 2007. – №46(18).
49. Fournier, F.R. Designing freeform reflectors for extended sources / F.R. Fournier, W.J. Cassarly, J.P. Rolland // *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration*. – 2009. – N VI.
50. Ries, H. Tailored edge-ray reflectors for illumination / H. Ries, R. Winston // *Opt. Soc. Am. A*. – 1994. – №11. – P. 1260–1264.
51. Jenkins, D. Tailored reflectors for illumination / D. Jenkins, R. Winston // *Appl. Opt.* – 1996. – № 35. – P. 1669–1672.
52. Mican, J.C. New method of design of nonimaging concentrators / J.C. Mican, J.C. Gonzalez // *Appl. Opt.* – 1992. – №31. – P. 30–51.
53. <http://www.philips.com>.
54. <http://www.oxytech.it>.
55. <http://www.schreder.com>.
56. <http://www.dial.de>.
57. Крутовой Р.Ж. Сравнительная характеристика программ расчета осветительных установок [Текст] / Р.Ж. Крутовой // *Коммунальное хозяйство городов: научно–техн. сб.* – № 38. – К.: Техніка, 2002. – С. 230 – 233
58. Крутовой Р.Ж. Об одном подходе к созданию программы расчета энергосберегающих систем освещения [Текст] / Р.Ж. Крутовой // *Коммунальное хозяйство городов: научно–техн. сб.* К.: –2003. – № 51. – С. 161 – 166.
59. Айзенберг, Ю.Б. Справочная книга по светотехнике; под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3–е изд., перераб. и доп. [Текст]. – М.: Знак 2006. – С. 972.

60. Карачев В.М. Комплексный расчет показателей наружного освещения улиц на ЭВМ [Текст] / В.М. Карачев, А.И. Митин // Светотехника. – 1988. – № 7. – С. 17 – 19.
61. Никитин В.Д. Совершенствование методов расчета освещения улиц [Текст] / В.Д. Никитин // Светотехника. – 2001. – № 3. – С. 27 – 29.
62. Харченко В.Ф. К вопросу моделирования освещения дорожного покрытия улиц и магистралей города [Текст] / В.Ф. Харченко // Светотехника и электроэнергетика. – 2008. – №4. – С. 73 – 79.
63. В.Ф. Харченко. Побудова динамічної моделі одностороннього освітлення вулиць і магістралей / В.Ф. Харченко, М.В. Хворост, В.А. Маляренко, О.А. Якунін// Світлотехніка та електроенергетика. – 2015. – № 2(42).
64. Харченко В.Ф. Основи енергозбереження та ефективності в системах освітлення міст: дис. доктора тех. наук : 05.09.07 / Харченко Віктор Федорович. – Харків., 2008. – 297 с.
65. Ди Фрайа Л. Оптимизация проектирования установок внутреннего освещения [Текст] / Л. Ди Фрайа // Светотехника. – 1996. – № 8. – С. 19 – 23.
66. Кронтхалер М. Программы автоматизированного управления освещением фирмы “Siemens” [Текст] /М. Кронтхалер // Светотехника. – 1997. – № 6. – С. 40 – 41.
67. Кноринг Г.К. Методика расчета освещения при отсутствии расчетных таблиц и графиков для данного типа светильника / Г.К. Кноринг // Светотехника. – 1995. – №8. – С. 27–30
68. Мальков М.А. Мощные компактные люминесцентные лампы – характеристики и особенности эксплуатации. Часть II / М.А. Мальков // Журнал "Современная светотехника". – 2014. – №5.
69. ГОСТ Р МЭК 60598–1–99. Межгосударственный стандарт.Светильники часть 1. Общие требования и методы испытаний.

70. www.osram.ru
71. www.geconsumerandindustrial.com
72. Свешников С.А. Применение энергосберегающих компактных люминесцентных ламп в традиционных светильниках ЖКХ (новый подход к энергосбережению) / С.А.Свешников, В.И. Хандогин// ООО «ЭЛиПС–О». – 2008.
73. Мальков М.А. Мощные компактные люминесцентные лампы – характеристики и особенности эксплуатации. Часть I / М.А. Мальков // Журнал "Современная светотехника". – 2014. – №4. – С. 48–52.
74. NLPIP Lighting Answers: Light Sources and Color Rensselaer // Polytechnic Institute. Lighting Research Center/ – 2004. – №10.
75. Rea M.S. Illuminating Engineering Society of North America / M.S.Rea // IESNA Handbook, ninth edition. – 2000. – P. 6–43.
76. Лупенко А. Метод широтно–імпульсного регулювання потужності розрядних джерел світла / А. Лупенко, Л. Мовчан, В. Натяга, І. Сисак // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 24 – 29.
77. Жаркин А.Ф. Анализ эффективности энергосберегающих КЛЛ / А.Ф. Жаркин, А.В. Козлов // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – №1(9). – С. 4–9.
78. Л. В. Егиазарян. Погрешности индукционных электросчетчиков в реальных условиях изменения напряжения сети, тока и коэффициента мощности [Текст] / Л. В. Егиазарян, Л. О. Караханян, Т. П. Асатрян // Известия НАН Армении и Государственного инженерного университета Армении. Сер. технических наук. – 2007. – Т. 60, № 1. – С. 124 – 129.
79. Т. Н. Савкова. Оценка точности измерений потребления электрической энергии светодиодными источниками света / Т. Н. Савкова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIII Междунар. науч.–техн. конф. студентов,

магистрантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2013 г. / М–во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун–т им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – С. 500—504.

80. Соколов В.С. Как работают электросчетчики при низком качестве энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/pdf/sokolov-2004.pdf>.

81. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии / В.В. Киеселев, И.С. Пономаренко // Промышленная энергетика. – 2004. – № 2. – С. 40–45

82. Предложения по инженерному решению проблемы качества электрической энергии / В.С. Соколов, Н.В. Чернышева // Промышленная энергетика. – 2001. – № 8. – С. 51–53.

83. П.Євтух. Облік електроенергії при несинусоїдальних і несиметричних режимах у мережах електропостачання міст / П.Євтух, С.Бабюк, Т.Кислиця // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 70. — № 2. — С.183–189. — (приладобудування та інформаційно–вимірювальні технології).

84. Андрійчук В.А. Моделювання світлового приладу з неточковим джерелом світла / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2014. – Том 73. – №1. – С 201–208. – (приладобудування та інформаційно–вимірювальні технології).

85. Андрійчук В.А. Моделювання світлового поля, створеного компактною люмінесцентною лампою / В.А. Андрійчук, С.Ю. Поталіцин // Світлолюкс. – 2012. – №4. – С. 53–55.

86. ООО «ОСП Корпорація ВАТРА» Каталог продукции 2016 год (версія 10-2015), выпуск №10. Режим доступа: <http://vatra.te.ua>.

87. Publication: CIE 115-1995. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic.

88. Кирилловский, В.К. Оптические измерения. Ч. 1-5 / В.К. Кирилловский// СПб.: – 2006.
89. Гуревич М. М. Фотометрия [Текст] / М. М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 272 с.
90. Мешков, В. В. Основы светотехники Ч. 2. [Текст]: учеб. / В. В. Мешков, А. Б. Матвеев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
91. Костик Л.М. Дослідження енергетичної ефективності світлових приладів для зовнішнього освітлення з різними джерелами світла / Л.М. Костик, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2014. – Том 76. – №4. – С. 173-181. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).
92. Костик Л.М. Світлотехнічний розрахунок світлових приладів із джерелами світла заданих геометричних розмірів / Л.М. Костик, С.Ю. Поталіцин // Вісник ТНТУ. – 2015. – Том 79. – №3. – С. 165-173. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).
93. Гершун А. А. Световое поле / А. А. Гершун // Избранные труды по фотометрии и светотехнике. – М. : Физматгиз, 1958. – С. 223 – 397.
94. Басова Ю. О. Дослідження світлової віддачі компактних люмінесцентних ламп залежно від їх конструкції / Ю. О. Басова // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013. – № 3/1 (11). – С. 6–9.
95. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том III. [Текст] / Г.М. Фихтенгольц // М.: Физматлит. – 2001. – С. 662.
96. Publication: Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters: Performance, characteristics and specifications.
97. IESNA LM-50-99. Guide for photometric measurement of Roadway lighting installations. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 1999.

98. ДБН В.2.2-20:2008. Здания и сооружения. – К.: Государственные строительные нормы Украины : Минрегионстрой Украины , 2009. – 19 с.

99. <http://www.lambdares.com>.

100. М.Тарасенко. Залежність номінальних світлових віддач джерел світла від номінальних потужностей / М.Тарасенко, К.Козак // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 70. — № 2. — С.173-183. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

101. Корн Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. –М.: 1974. – 832с.

102. Синг Дж. Л. Классическая динамика [Текст] / Дж. Л. Синг. – М.: Энергоатомиздат, 1963. – С. 450.

103. ГОСТ 26824-86. Межгосударственный стандарт. Здания и сооружения. Методы измерения яркости.

104. Andriychuk V. The effect of energy-efficient light sources on the quality of electricity / V. Andriychuk, N. Lipovetsky, M. Nakonechny, S. Potalitsyn // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. – Tallinn – 2016. №1. – P. 38-48.

105. Кожушко Г. М. Динаміка світлових та колірних характеристик компактних люмінесцентних ламп протягом тривалості горіння та залежно від напруги живлення / Г. М. Кожушко, О. Ю. Басова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2015. – № 1 (41). С. 31–36.

106. Вернер И. С. Исследование электротехнических и светотехнических характеристик источников излучения, применяемых в АПК / И. С. Вернер, В. П. Мальцев // Эпоха науки. – 2016. №2. – С. 28-37.

107. Вагин Г.Я. Исследования пожарной опасности современных источников света / Г.Я. Вагин, О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин, П.В. Терентьев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №9. – С. 9–15.

108. «Энергосберегающие компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), особенности». Информационный проект команды «AVD-Energo» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://energia.3dn.ru/publ/ehkonomija_ehlektroehnergii/ehnergosberegajushhie_kompaktnye_ljuminescentnye_lampy_kll_osobennosti/7-1-0-15.

109. DS18B20 русское описание работы с датчиком температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://labkit.ru/userfiles/file/documentation/Sensor/DS18B20_RU.pdf.

110. GL55 Series CdS Photoresistor Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://akizukidenshi.com/download/ds/senba/GL55%20Series%20Photoresistor.pdf>.

111. А.А. Алямовский. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике/А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А. И. Харитонович. – СПб.: БХВ-Петербург. 2008. – С. 1040.

112. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

113. EN 61000-3-2:2006+A1+A2 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 3 – 2: Limits — Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).

114. ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004. Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу) - К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 24 с.

115. Зиатдинов С.И. Восстановление сигнала по его выборке на основе теоремы отсчетов Котельникова / Зиатдинов С.И. // ИЗВ. вузов

приборостроения. – 2010. – №5. – С. 44–47. – (электронные и электромагнитные устройства).

116. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. школа, 1978. – С. 528.

117. Iaroslav V. Analytic Method for the Computation of the Total Harmonic Distortion by the Cauchy Method of Residues / V. Iaroslav, E. Moreau // IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS. – 2011. №9(59). – P. 2478–2491.

118. Батырканов Ж.И., Асхат А. Информационные технологии автоматизации учета электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arch.kyrlibnet.kg/?&npage=view&nadd=5577>.