

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ ЛАМП РОЗЖАРЕННЯ З ТОЧКИ ЗОРУ ВАРТОСТІ ОДИНИЦІ СВІТЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі проведено дослідження енергоефективності регулювання світлового потоку ламп розжарення з точки зору вартості одиниці світлової енергії. Установлено, що всю множину можливих діючих значень напруг на затискачах ламп розжарення можна розбити на п'ять діапазонів: високої, середньої та низької енергоефективності процесу регулювання світлового потоку з виділенням збиткового та забороненого, для використання в алгоритмах регулювання світлового потоку, діапазонів. Наведено відповідні рекомендації для розробників регуляторів світлового потоку ламп розжарення.

### Умовні позначення

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $n$                              | – номер режиму експлуатації ;  |
| $U_n, t_n, H_{np}, P_n$          | – номінальна напруга мережі (В), середня тривалість горіння (години), світлова віддача (лм/Вт) та потужність(Вт) стандартних ламп розжарення відповідно;   |
| $U_{nБ}, t_{nБ}, H_{nБ}, P_{nБ}$ | – напруга мережі (В), середня тривалість горіння (годин), світлова віддача (лм/Вт) та потужність (Вт) базової лампи розжарення в $n$ -му режимі експлуатації ( $n \neq 1$ ) відповідно , (при $n=1$ – номінальні їх значення) ;  |
| $M_n$                            | – кількість ламп розжарення меншої потужності, які ввімкнені на номінальну напругу мережі, необхідних для генерації такої ж кількості світлової енергії, яку випромінює базова лампа розжарювання в $n$ – му режимі експлуатації за середню тривалість горіння ( $t_{nБ}$ ), шт ;  |
| $V_{nБ}, V_{Mn}, V_{1Б}$         | – вартість 1 Млм світлової енергії, яку випромінює базова лампа розжарення за середню тривалість горіння в $n$ -му режимі експлуатації, яку випромінюють $M_n$ ламп розжарення зі стандартного ряду потужностей при їх експлуатації від номінальних значень напруги мережі, яку випромінює базова лампа розжарення при її експлуатації від номінальної напруги мережі відповідно, грн. ; |
| $H_{np}, P_{np}, U_{np}, V_{np}$ | – зведенні значення світлової віддачі ( $H_{np}=H_{nБ}/H_{1Б}$ ), потужності ( $P_{np} = P_{nБ} / P_{1Б}$ ), напруги мережі ( $U_{np} = U_{nБ} / U_{1Б}$ ) та вартості одиниці світлової енергії ( $V_{np} = V_{nБ} / V_{1Б}$ ) базової лампи розжарення в $n$ – му режимі експлуатації відповідно;  |
| $E_{nБ}, E_n$                    | – світлова енергія, яку випромінює базова лампа розжарювання за середню тривалість горіння в $n$ -му режимі експлуатації та лампа розжарювання меншої потужності із такою ж світловою віддачею, як і у базової лампи розжарення, за середню тривалість горіння в номінальному режимі експлуатації відповідно, лм×год.;   |
| $q, q_{lr}(q_{lr.Б}), \alpha$    | – вартість однієї кВт×години електроенергії, однієї лампи розжарення (базової лампи розжарення) та однієї заміни перегорілої лампи розжарення відповідно, грн;   |
| $C_{lr.n}$                       | – витрати, пов'язані з придбанням $M_n$ ламп розжарення меншої потужності, з стандартного ряду потужностей, на місце перегорілих для $n$ – го режиму експлуатації базової лампи розжарювання, грн.;  |
| $C_{zm.n}$                       | – витрати, пов'язані з заміною ( $M_n-1$ ) перегорілих ламп розжарення меншої потужності з стандартного ряду потужностей в $n$ -му режимі експлуатації базової лампи розжарення , грн.;  |
| $C_{el.n}$                       | – витрати, пов'язані з оплатою спожитої $M_n$ лампами розжарення меншої потужності (з стандартного ряду потужностей) електроенергії за середню тривалість горіння в $n$ –му режимі експлуатації, грн.;   |
| $m_m$                            | – швидкість випаровування вольфраму у вакуумі, г/(см <sup>2</sup> ×с) .  |

**Постановка проблеми.** Зростання вартості енергетичних ресурсів і загальнонаціональна актуальність проблеми енергоощадності привели до того, що у всіх організаціях і установах питання енергетичного менеджменту почали розглядатися як задачі особливої важливості. Аналіз освітлювальних установок України показав, що в більшості вони не відповідають вимогам енергоощадності й економічності, тобто

існує можливість для їх модернізації на основі застосування як більш ефективних джерел світла, так і більш ефективних систем керування світловим потоком у конкретні моменти часу, з таким розрахунком, щоб вартість одиниці світлової енергії була мінімально можливою. Ці питання безпосередньо пов'язані з основними положеннями Закону України про енергозбереження [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** показав, що проблема енергозбереження у світлотехніці стала особливо актуальною [2,3]. При цьому основні зусилля сконцентровані на впровадженні в практику сучасних високоефективних (як правило розрядних) джерел світла та методів і режимів їх експлуатації. Лампи розжарення (ЛР) практично забуті й віднесені до малоефективних джерел світла. Це, на наш погляд, абсолютно не правильно. ЛР, хоча і не належать до високоефективних джерел світла, але області їх використання, як показав аналіз, постійно розширюються. Про це переконливо свідчить той факт, що за останні 20 років об'єми їх випуску у всьому світі зросли вдвічі з 7,5 млрд. шт. в 1980 році до 15 млрд. шт. в 2000 році [4].

**Постановка завдання.** Вищезгадане вказує на *актуальність* проведення подальших досліджень режимів експлуатації ЛР *із метою визначення їх оптимальності з точки зору вартості одиниці світлової енергії*. Це дасть можливість створювати енергоефективні системи регулювання світлового потоку освітлювальних установок з ЛР. Саме з цією метою нами і були проведені відповідні дослідження, результати яких і висвітлені в даній статті.

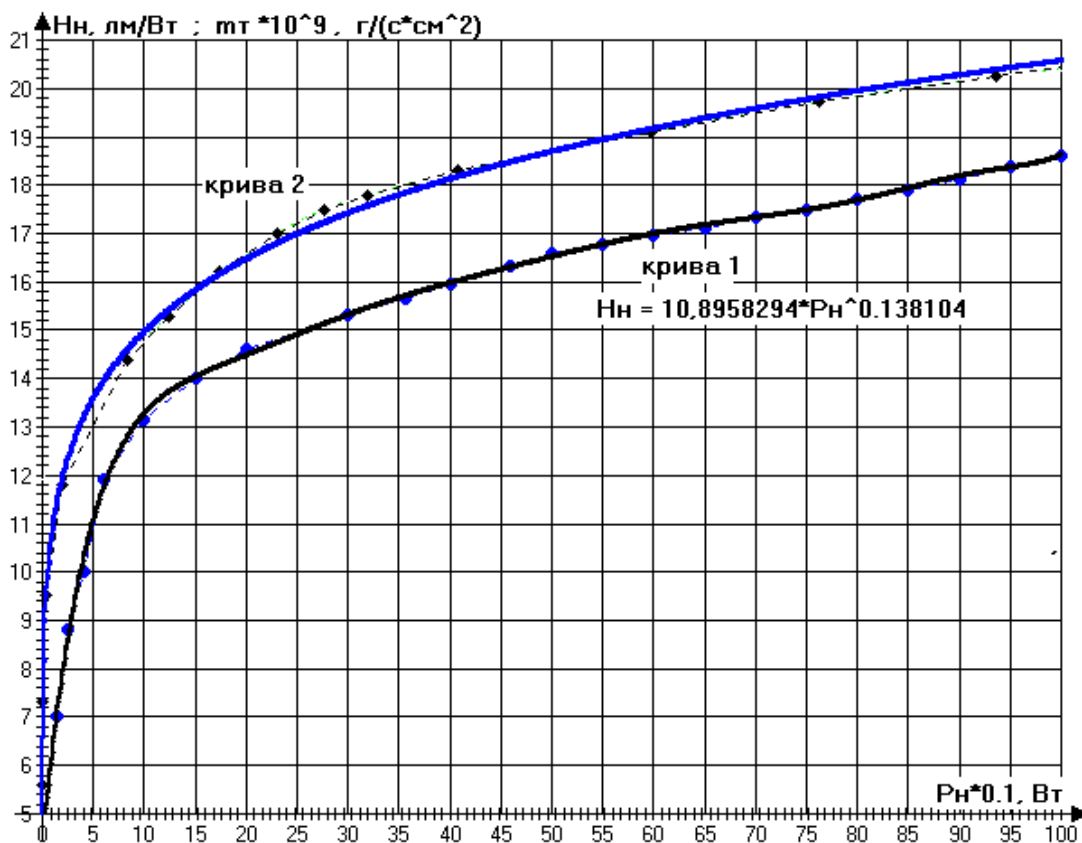


Рисунок 1 - Залежність номінальної світлової віддачі  $H_n$  (крива 1) та швидкості випаровування вольфрамової нитки у вакуумі  $m_r$  (крива 2) від номінальних потужностей ЛР.

Незважаючи на те, що у ламп розжарення загального призначення більшої потужності діаметр вольфрамового дроту тіла розжарення помітно більший ніж у ламп меншої потужності (діаметр вольфрамового дроту для ЛР потужністю 15 Вт дорівнює 15 мкм, а для ЛР потужністю 100 Вт – 45 мкм), їх середні тривалості горіння практично однакові і дорівнюють 1000 годинам. Це зумовлено тим, що світлова

віддача, а разом із нею і швидкість випаровування вольфраму, у більш потужних ламп помітно більші ніж у ЛР меншої потужності. Про це переконливо свідчить ідентичність ходу залежностей номінальних світлових віддач ( $H_n$ ) та швидкості випаровування вольфрамової нитки у вакуумі ( $m_t$ ) від номінальних потужностей ЛР ( $P_n$ ) (див. рис.1), побудованих за даними [5,6].

Для конструктивно однотипних тіл розжарення, які працюють у середовищі інертних газів, що характерно для ЛР загального призначення [5], залежність  $m_t = f(P_n)$  буде проходити нижче кривої  $m_t = f(P_n)$ , але закономірність не зміниться [6]. Саме ця обставина і вказує на доцільність проведення оцінки ефективності експлуатації ЛР більшої потужності (*базових ЛР*) від занижених таким чином напруг мережі, щоб їх світлова віддача дорівнювала, а середня тривалість горіння стала помітно більшою від відповідних параметрів ЛР меншої потужності зі стандартного ряду потужностей, підключених до номінальної напруги мережі. При такому підході у нас будуть всі необхідні вихідні дані для проведення розрахунків вартості одиниці світлової енергії (1 Млм×год.) за середню тривалість горіння при експлуатації ЛР більшої потужності (*базових ЛР*) у режимах із номінальними світловими віддачами ламп меншої потужності. В результаті стане можливою побудова залежностей кількості й вартості одиниці світлової енергії, яку генерує базова ЛР за середню тривалість горіння, від діючих значень напруги мережі. Це дозволить визначити області енергоефективного регулювання світлового потоку, виходячи з *точки зору вартості одиниці світлової енергії*.

Для того щоб результати розрахунків можна було порівнювати, була прийнята умова, що кількість світлової енергії, яку генерує базова ЛР за середню тривалість горіння в  $n$ -му режимі експлуатації, дорівнює кількості світлової енергії, яку генерують  $M_n$  ЛР меншої потужності, підключених до номінальної напруги мережі.

Оцінка проводилася наступним чином: ЛР потужністю 1000 Вт (базова ЛР) досліджувалася в режимах експлуатації з номінальними світловими віддачами, характерними для ЛР від 750 Вт до 15 Вт із стандартного ряду потужностей; ЛР потужністю 750 Вт (базова ЛР) – від 500 Вт до 15 Вт, ЛР потужністю 500 Вт (базова ЛР) – від 300 Вт до 15 Вт і т.д. Тобто ми виходили з того, що за базову може бути прийнята ЛР будь-якої потужності, регулювання світлового потоку якої виявиться економічно доцільним *із точки зору вартості одиниці світлової енергії*. Для ЛР загального призначення це можуть бути лампи потужністю 1000, 750, 500, 300, 200, 150, 100, 75 Вт.

Потужність і напруга мережі, при якій світлова віддача базової ЛР дорівнює номінальній світловій віддачі ЛР меншої потужності, визначалися з експериментальних залежностей рис. 2, знятих на обладнанні світлотехнічної лабораторії ВАТ “ВАТРА”. Для кожного  $n$ -го режиму експлуатації спочатку ми визначали зведену світлову віддачу ( $H_{np}$ ) як відношення номінальної світлової віддачі ЛР меншої потужності (світлової віддачі базової ЛР у  $n$ -му режимі експлуатації) до номінальної світлової віддачі базової ЛР більшої потужності  $H_{np} = H_n / H_{1B}$  ( $H_{np} = H_{nB} / H_{1B}$ ). За отриманим значенням  $H_{np}$  із рис. 2 визначали зведене значення напруги мережі ( $U_{np}$ ), при якому світлова віддача базової ЛР в  $n$ -му режимі експлуатації буде дорівнювати номінальній світловій віддачі ЛР меншої потужності. За зведеним значенням  $U_{np}$  із рис. 3 знаходили зведене значення потужності базової ЛР ( $P_{np}$ ) у  $n$ -му режимі експлуатації. За відомими значеннями  $U_{np}$ ,  $P_{np}$  знаходили дійсні значення напруги мережі  $U_{nB}$ , до якої підключена базова ЛР у  $n$ -му режимі експлуатації, і реальну потужність цієї лампи  $P_{nB}$  у цьому ж  $n$ -му режимі експлуатації за формулами

$$U_{nB} = U_{np} \times U_{1B}, \quad B; \quad P_{nB} = P_{np} \times P_{1B}, \quad \text{Вт.}$$

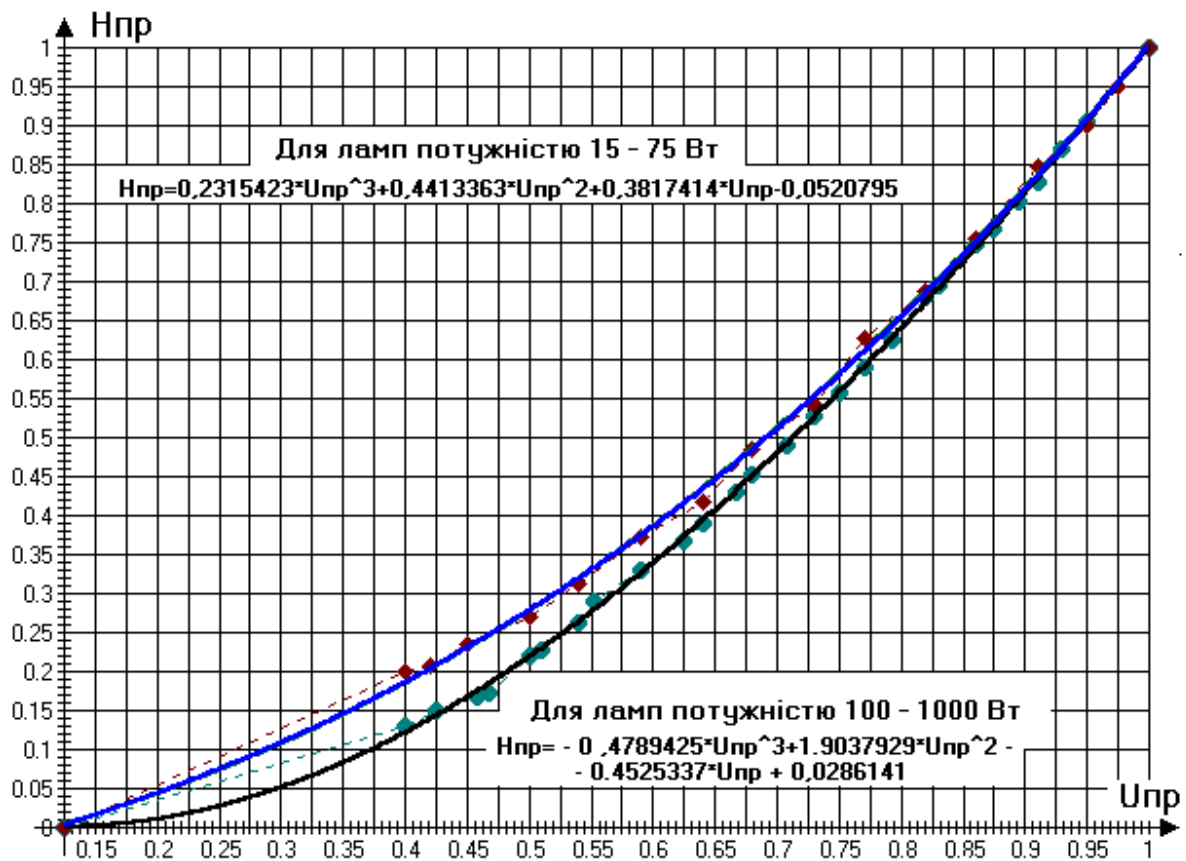


Рисунок 2 - Залежність зведеної світлової віддачі ( $H_{пр}$ ) ЛР від зведеної напруги мережі ( $U_{пр}$ ).

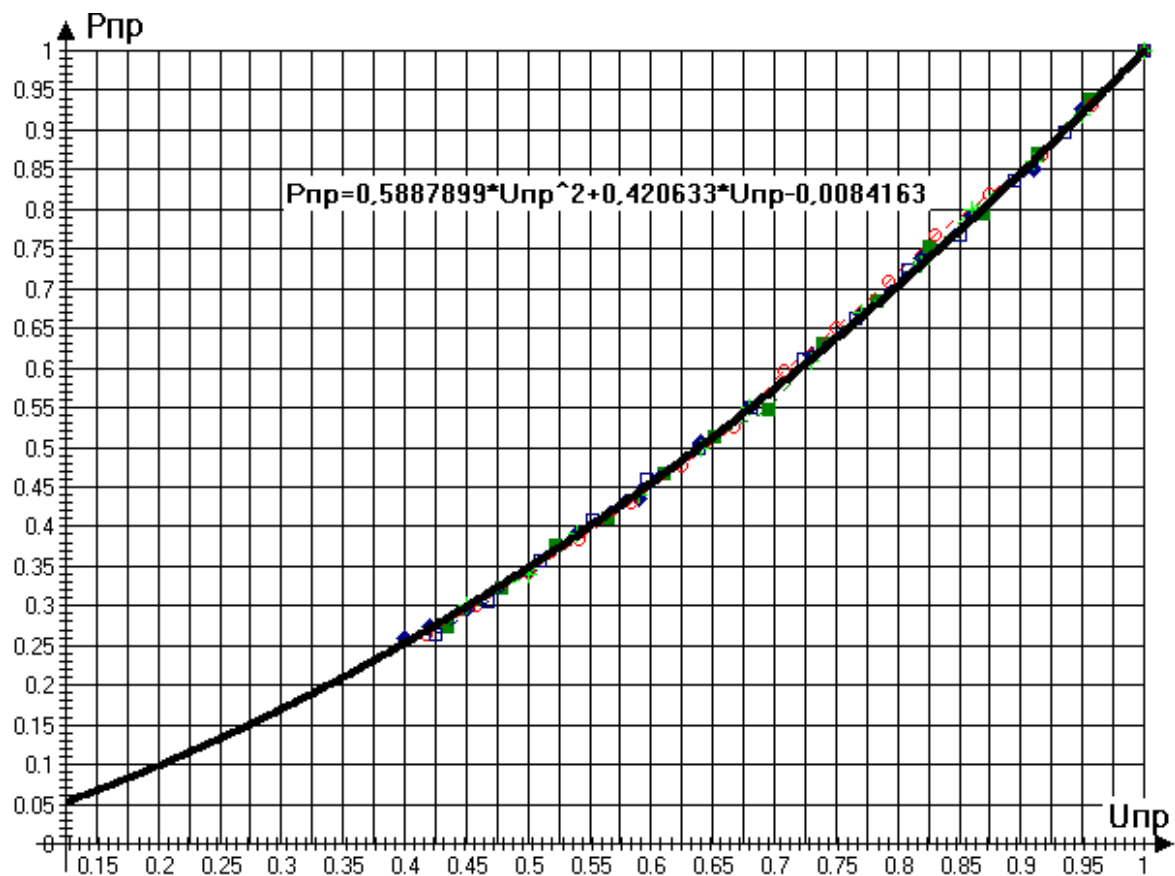


Рисунок 3 - Залежність зведеної потужності ( $P_{пр}$ ) ЛР від зведеної напруги мережі ( $U_{пр}$ ).

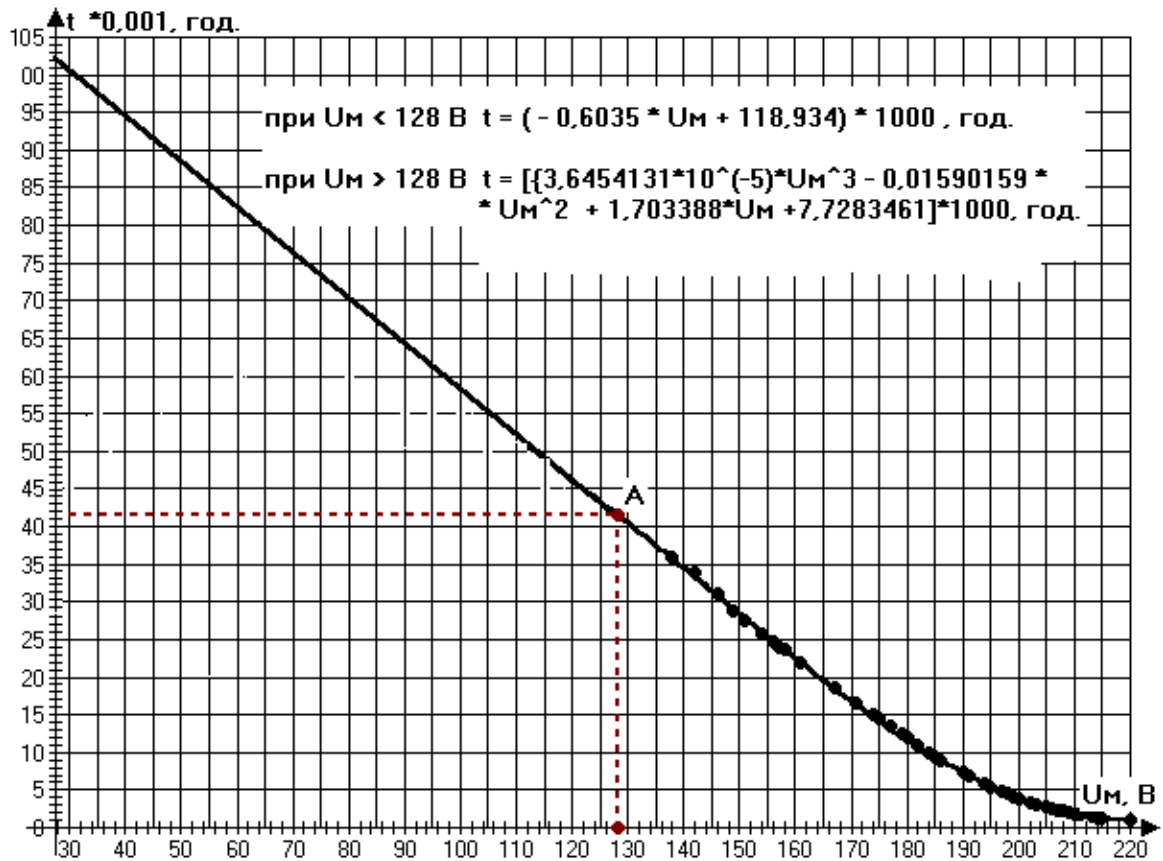


Рисунок 4 - Залежність середньої тривалості горіння (t) ЛР від діючих значень напруги мережі(Uм).

Середня тривалість горіння базових ЛР при експлуатації від занижених напруг мережі визначалася з графіка (рис. 4), побудованого на основі даних, наведених в [5,6], залежності  $m_T=f(P_n)$  (рис. 1) та отриманих нами даних у результаті довготривалих досліджень залежності середньої тривалості горіння ЛР від діючих значень напруги мережі.

При розрахунках були прийняті наступні (зведені в табл. 1) сталі вихідні дані

Таблиця 1 - Сталі вихідні дані для розрахунків

U <sub>н</sub> = U <sub>1Б</sub> = 220 В; q = 0,156 грн.; α = 0,25 грн.; t <sub>1Б</sub> = t <sub>н</sub> = 1000 годин.											
P <sub>н</sub> (P <sub>нБ</sub> ), Вт	15	25	40	60	100	150	200	300	500	750	1000
q <sub>лр</sub> (q <sub>лр.Б</sub> ), грн.	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,5	2,0	3,5	5,0	8,0	10,0
H <sub>н</sub> (H <sub>1Б</sub> ), лм/Вт	7,0	8,8	10,0	11,9	13,15	14,0	14,6	15,3	16,6	17,5	18,6

Далі для вибраної базової ЛР присвоювалися значення P<sub>1Б</sub>, U<sub>лр.Б</sub>, H<sub>1Б</sub> і для кожного кроку розрахунків (номеру режиму експлуатації n) вводилися дані про ціну не базової ЛР (q<sub>лр</sub>) та дані про потужність (P<sub>нБ</sub>), світлову віддачу (H<sub>нБ</sub>) і середню тривалість горіння (t<sub>нБ</sub>) базової ЛР, підключеної до заниженої таким чином напруги мережі (див. табл. 2 і 3), щоб світлова віддача базової ЛР дорівнювала номінальній світловій віддачі ЛР меншої потужності зі стандартного ряду потужностей.

Розрахунки для кожного n-го режиму експлуатації проводилися за нижче наведеними формулами в тій послідовності, як вони і записані

$$E_{нБ} = P_{нБ} \times H_{нБ} \times t_{нБ}; \quad (1) \quad C_{zm.n} = (M_n - 1) \times \alpha; \quad (6)$$

$$E_n = P_n \times 10^{-3} \times H_n \times t_n; \quad (2) \quad C_{\Sigma n} = C_{el.n} + C_{lr.n} + C_{zm.n} \quad (7)$$

$$M_n = E_{нБ} / E_n; \quad (3) \quad C_{\Sigma нБ} = P_{нБ} \times 10^{-3} \times t_{нБ} \times q + q_{лр.Б}; \quad (8)$$

$$C_{el.n} = P_n \times t_n \times M_n \times q; \quad (4) \quad V_{Mn} = 10^6 \times C_{\Sigma n} / E_{нБ}; \quad (9)$$

$$C_{lr.n} = M_n \times q_{лр}; \quad (5) \quad V_{нБ} = 10^6 \times C_{\Sigma нБ} / E_{нБ}; \quad (10)$$

Вищезгадані змінні вихідні дані (*курсив*) та результати розрахунків (основний шрифт напівжирно) для базових ЛР потужністю 1000 Вт, 750 Вт, 500 Вт, 300 Вт, 200 Вт, 150 Вт, 100 Вт, 75 Вт зводилися у таблиці, аналогічні до таблиць 2 і 3, які наведені у даній роботі, для прикладу, для двох потужностей базових ЛР 1000 Вт і 100 Вт.

Таблиця 2 - Вихідні дані та результати розрахунків для ЛР 1000 Вт

Вихідні дані та результати розрахунків для базової ЛР потужністю 1000 Вт									
n	U <sub>нб</sub> , В	P <sub>нб</sub> , Вт	H <sub>нб</sub> , лм/Вт	t <sub>нб</sub> , годин	M <sub>н</sub> , шт	C <sub>г.н.</sub> , грн.	E <sub>нб</sub> , Млм·год	V <sub>нб</sub> , грн.	V <sub>Mn</sub> - V <sub>нб</sub> грн.
1	220	1000	18,6	1000	1	10	18,60	8,925	0,000
2	213	950	17,5	1650	1	10	27,43	9,279	+ 0,255
3	207	906	16,6	2350	1	10	35,34	9,681	+ 0,342
4	199	851	15,3	4000	1	10	51,74	10,456	+ 0,625
5	194	818	14,6	5800	1	10	69,27	10,849	+ 0,633
6	190	794	14,0	7300	1	10	81,15	11,266	+ 0,707
7	184	757	13,15	10000	1	10	99,55	11,964	+ 1,037
8	175	705	11,9	14500	1	10	121,60	13,191	+ 1,317
9	158	603	10,0	23600	1	10	142,30	15,670	+ 2,428
10	149	547	8,8	28700	1	10	138,20	17,800	+ 4,471
11	138	484	7,0	36000	1	10	122,00	22,368	+ 9,440
12	132	456	6,3	39130	1	10	112,00	24,850	+ 7,020
13	121	402	5,15	45700	1	10	94,60	30,400	+ 1,470
14	110	348	4,07	52390	1	10	74,20	38,460	- 6,590
15	99	300	3,13	59150	1	10	55,50	50,020	-18,15
16	88	253	2,25	65700	1	10	37,40	69,600	- 37,73
17	77	211	1,54	72400	1	10	23,50	101,72	- 69,85
18	66	171	0,967	79000	1	10	13,06	162,10	- 130,23
19	55	134	0,502	85661	1	10	5,76	312,50	- 280,63
20	44	99	0,186	92200	1	10	1,694	844,50	- 812,63
Вихідні дані та результати розрахунків для ЛР із стандартного ряду потужностей									
n	U <sub>н</sub> , В	P <sub>н</sub> , Вт	H <sub>н</sub> , лм/Вт	t <sub>н</sub> , годин	M <sub>н</sub> , шт	C <sub>г.н.</sub> , грн.	E <sub>н</sub> , Млм·год	V <sub>Mn</sub> , грн.	-----
2	220	750	17,5	1000	2	16,72	13,120	9,534	-----
3	220	500	16,6	1000	4	21,29	8,300	10,023	-----
4	220	300	15,3	1000	11	39,71	4,560	11,081	-----
5	220	200	14,6	1000	23	47,44	2,920	11,452	-----
6	220	150	14,0	1000	39	57,96	2,100	11,973	-----
7	220	100	13,15	1000	76	94,62	1,315	13,001	-----
8	220	60	11,9	1000	170	121,78	0,714	14,508	-----
9	220	40	10,0	1000	356	266,83	0,400	18,098	-----
10	220	25	8,8	1000	628	470,97	0,220	22,271	-----
11	220	15	7,0	1000	1162	871,20	0,105	31,870	-----

Аналіз результатів розрахунків (див. табл. 2, 3), з одного боку, підтвердив загальновідомий факт про доцільність застосування в освітлювальних установках джерел світла з максимально можливими світловими віддачами у зв'язку з тим, що експлуатація ЛР від занижених напруг мережі завжди приводить до падіння світлової віддачі та зростання вартості одиниці світлової енергії. З іншого боку, не спростував факту доцільності регулювання (зменшення) світлового потоку ЛР, а тільки обмежив його глибину економічною доцільністю. Дійсно, як видно з табл. 2 (остання колонка справа), різниця вартостей 1 Млм×год світлової енергії, яку випромінюють M<sub>н</sub> ЛР із

стандартного ряду потужностей при їх експлуатації від номінального значення напруги мережі  $V_{Mn}$  та 1 Млм×год світлової енергії, яку випромінює базова ЛР за середню тривалість горіння в  $n$  – му режимі експлуатації  $V_{nб}$ , постійно зростає, досягаючи свого найбільшого значення  $\approx 9,44$  грн у той момент, коли світлова віддача базової ЛР дорівнює номінальній світловій віддачі ЛР потужністю 15 Вт. Це зумовлено стрімким зростанням середньої тривалості горіння базових ЛР, а значить, і кількістю виробленої ними світлової енергії  $E_{nб}$  при їх експлуатації від занижених напруг мережі (див.рис.4).

Таблиця 3 - Вихідні дані та результати розрахунків для ЛР 100 Вт

Вихідні дані та результати розрахунків для базової ЛР потужністю 100 Вт									
n	$U_{nб}$ , В	$P_{nб}$ , Вт	$H_{nб}$ , лм/Вт	$t_{nб}$ , годин	$M_n$ , шт	$C_{г.п.}$ , грн.	$E_{nб}$ , Млм·год	$V_{nб}$ , грн.	$V_{Mn} - V_{nб}$ грн.
1	220	100	13,15	1000	1	0,75	1,315	12,43	+0,000
2	209	92	11,9	2000	1	0,75	2,156	13,45	+0,950
3	191	80	10,0	6800	1	0,75	5,482	15,74	+2,310
4	179	73	8,8	12500	1	0,75	7,573	17,83	+4,410
5	161	62	7,0	22000	1	0,75	9,364	22,36	+9,440
6	154	57	6,3	26190	1	0,75	9,459	24,84	+6,94
7	141	50	5,15	34210	1	0,75	8,827	30,36	+1,42
8	127	43	4,07	42270	1	0,75	7,405	38,43	-6,65
9	114	37	3,13	50210	1	0,75	5,768	49,97	-18,19
10	100	30	2,25	58600	1	0,75	4,013	69,50	-37,72
11	87	25	1,54	66530	1	0,75	2,555	101,57	-69,78
12	74	20	0,98	74280	1	0,75	1,434	161,87	-130,09
13	60	15	0,502	82420	1	0,75	0,628	311,90	-280,12
14	40	11	0,186	90590	1	0,75	0,128	844,52	-812,74
Вихідні дані та результати розрахунків для ЛР із стандартного ряду потужностей									
n	$U_n$ , В	$P_n$ , Вт	$H_n$ , лм/Вт	$t_n$ , годин	$M_n$ , шт	$C_{г.п.}$ , грн.	$E_n$ , Млм·год	$V_{Mn}$ , грн.	-----
2	220	60	11,9	1000	3	2,30	0,714	14,40	-----
3	220	40	10,0	1000	14	10,20	0,400	18,05	-----
4	220	25	8,8	1000	36	27,34	0,220	22,24	-----
5	220	15	7,0	1000	91	68,31	0,105	31,78	-----

Тому для того , щоб ЛР меншої потужності, ввімкнені на номінальну напругу мережі, генерували таку ж кількість світлової енергії, як і базова ЛР за середню тривалість горіння  $t_{nб}$  в  $n$ –му режимі експлуатації, необхідно застосувати в стільки ж разів більше ЛР меншої потужності (в  $M_n$  раз), в скільки разів світлова енергія базової ЛР ( $E_{nб}$ ) перевищує світлову енергію стандартних ЛР меншої потужності ( $M_n = E_{nб} / E_n$ ). Придбання та заміна такої кількості перегорілих ЛР приводить до зростання вартості одиниці світлової енергії, виробленої ЛР меншої потужності, в порівнянні з базовою ЛР. Таким чином, при регулюванні світлового потоку базових ЛР зростання вартості одиниці світлової енергії спочатку (до т.С для ЛР потужністю 100 Вт та до т. Е для ЛР потужністю 1000 Вт на рис.5) відбувається значно повільніше ніж при застосуванні ЛР меншої потужності, ввімкнених на номінальну напругу мережі. Далі поступово (після т. С (Е) на рис. 5) вартість одиниці світлової енергії базових ЛР зрівнюється з вартістю одиниці світлової енергії ЛР найменшої потужності (15 Вт), ввімкненої на номінальну напругу мережі (т.Е та т. G відповідно для ЛР потужністю 100 Вт і 1000 Вт), і, нарешті, перевищує її після точок Е та G, що приводить до зміни знаку різниці ( $V_{Mn} - V_{nб}$ ), яка надалі поступово зростає за абсолютною величиною. Момент зміни знаку різниці ( $V_{Mn} - V_{nб}$ ) вказує на початок слабкої економічної доцільності подальшого зменшення світлового потоку.

Дослідження залежності приведеної вартості одиниці світлової енергії від діючих значень напруги мережі  $(V_{нБ}/V_{1Б})=f(U_{нБ})$  показало, що вона добре апроксимується за допомогою двох кривих, які описуються поліномами типу  $Y=b+a_1 \cdot x+a_2 \cdot x^2+\dots+a_n \cdot x^n$  восьмої та другої степені відповідно. Вказані криві перетинаються в т. **F**, яка характеризує перехід від плавного до крутого зростання вартості одиниці світлової енергії при зменшенні напруги мережі. Абсциса т. **F** відповідає  $U_{нБ}=0,327$  (див. рис. 5), в якій кількість виробленої світлової енергії ЛР дорівнює кількості світлової енергії цієї ж лампи в номінальному режимі експлуатації. У зв'язку з цим т.**F** може бути прийнята за граничну для діапазону напруг  $0,327 \leq U_{нБ} \leq 0,540$ , для якого характерна слабка енергоефективність регулювання світлового потоку ЛР.

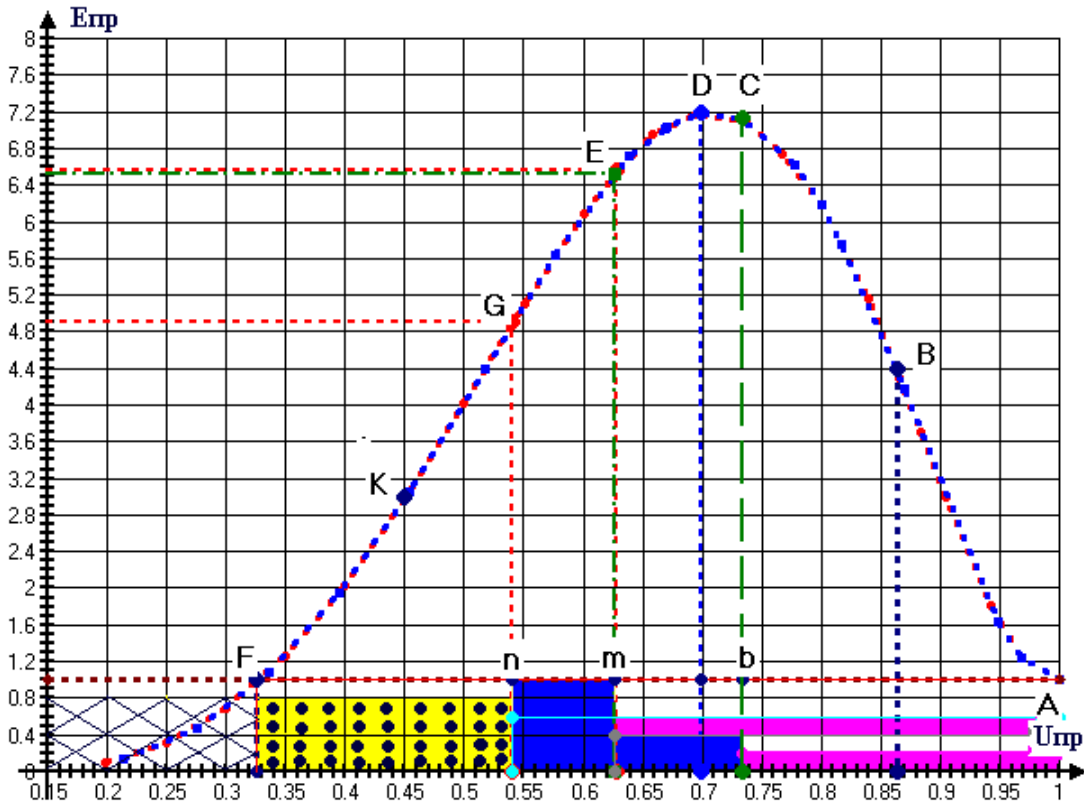


Рисунок 5 - Кількість зведеної світлової енергії ( $E_{пр}$ ), виробленої лампами розжарення потужністю 100 Вт – 1000 Вт, від зведеної напруги мережі ( $U_{пр}$ ).

Починаючи з т. **F** ( $U_{нБ}=0,327$ ) вартість одиниці світлової енергії настільки стрімко зростає, що при  $U_{нБ}=0,125$  стає нескінченно великою. Це пояснюється тим, що при зведених напругах мережі  $U_{нБ} \leq 0,125$  ЛР хоча і споживає електричну енергію, але не випромінює жодного люмена світлового потоку. У результаті знаменник у формулі (10)  $E_{нБ}=0$ , а  $V_{нБ}=\infty$ . У зв'язку з цим у вказаному діапазоні напруг ( $0,125 \leq U_{нБ} \leq 0,327$ ) тривала експлуатація ЛР повністю збиткова. Короткочасна експлуатація ЛР у вказаному діапазоні напруг допустима тільки в тих випадках, коли це необхідно з технологічною метою, наприклад, при штучній імітації добових змін освітленості в приміщеннях птахофабрик (світанок, день, захід сонця, ніч), у кінотеатрах перед початком сеансу, кіноконцертних залах, театрах, планетаріях тощо.

При подальшому зменшенні напруги мережі в діапазоні  $0 \leq U_{нБ} \leq 0,125$  світловий потік залишається таким, що дорівнює нулю, а потужність, яка споживається ЛР, поступово зменшується до нуля. Вартість одиниці світлової енергії постійно залишається нескінченно великою. Тому затримуватись у вказаному діапазоні немає ніякого сенсу. Найкраще його вилучити з алгоритму регулювання світлового потоку шляхом миттєвого вимкнення (зв'імкнення) від (до) напруги мережі або пройти за найкоротший час.



Залежність кількості виробленої базовими ЛР приведеної світлової енергії ( $E_{пр}$ ) від приведеної напруги мережі ( $U_{пр}$ ) проходить через максимум (т. **D** на рис. 5) практично завжди при одному й тому ж значенні зведеної напруги мережі ( $U_{пр}=0,7$ ) незалежно від потужності ЛР.

**Висновки.** Всю множину значень зведених напруг мережі ( $0 \leq U_{пр} \leq 1$ ) можна розбити на п'ять діапазонів у залежності від міри енергоефективності регулювання світлового потоку ЛР:

1. Діапазон високої енергоефективності регулювання світлового потоку ЛР, в межах якого спостерігається постійне зростання різниці вартостей одиниці світлової енергії, виробленої базовою та  $M_n$ -ною кількістю ЛР меншої потужності, із такою ж світловою віддачею, як і у базовій ЛР, підключених до номінальної напруги мережі. З ростом потужності базової ЛР указаний діапазон поступово розширюється від  $0,734 \leq U_{пр} \leq 1$  (на рис.5 це відрізок **Ab**) для ЛР потужністю 100 Вт, до  $0,626 \leq U_{пр} \leq 1$  (на рис. 5 - це відрізок **Abm**) для ЛР потужністю 1000 Вт. Розширення відбувається за рахунок поступового переміщення т. **C** на залежності  $E_{пр}=f(U_{пр})$  у т. **E**. Світловий потік у т. **B** в 1,7 рази, у т. **C** в 3 рази, у т. **D** в 3,7 рази, у т. **E** в 5,4 рази менший від номінального.

2. Діапазон середньої енергоефективності регулювання світлового потоку ЛР, в межах якого спостерігається поступове падіння різниці вартостей одиниці світлової енергії, виробленої базовою та  $M_n$ -ною кількістю ЛР меншої потужності, із такою ж світловою віддачею, як і у базовій ЛР, підключених до номінальної напруги мережі. Для базової ЛР потужністю 100 Вт - це відрізок **bm** інтервалу напруг  $0,626 \leq U_{пр} \leq 0,734$  на рис. 5, для 1000 Вт - це відрізок **mn** інтервалу напруг  $0,540 \leq U_{пр} \leq 0,626$ . В кінці кожного з указаних інтервалів різниця  $(V_{Mn} - V_{нБ}) = 0$ . Це точки **m** і **n** відповідно. Світловий потік у т. **G** в 9,7 рази менший від номінального.

3. Діапазон низької енергоефективності регулювання світлового потоку ЛР, в межах якого різниця  $(V_{Mn} - V_{нБ})$  має від'ємні значення, які поступово збільшуються за абсолютною величиною. Для базової ЛР потужністю 100 Вт - це відрізок **mF** інтервалу напруг  $0,326 \leq U_{пр} \leq 0,626$  на рис. 5, для 1000 Вт - це відрізок **nF** інтервалу напруг  $0,326 \leq U_{пр} \leq 0,540$ . Обидва вказані інтервали закінчуються в т. **F**, де кількість виробленої будь-якою з базових ЛР світлової енергії дорівнює номінальній кількості світлової енергії цієї ж лампи. Світловий потік у т. **K** в 19 разів, а в т. **F** в 75 разів менший від номінального.

4. Збитковий для тривалої експлуатації ЛР діапазон знаходиться в межах  $0,125 \leq U_{пр} \leq 0,326$ . В межах цього діапазону спостерігається дуже стрімке зростання від'ємної різниці  $(V_{Mn} - V_{нБ})$ , яка при  $U_{пр} = 0,125$  стає нескінченно великою в момент, коли  $E_{нБ} = 0$ . Короткочасна експлуатація ЛР у вказаному діапазоні напруг допустима тільки в тих випадках, коли це необхідно в технологічних цілях.

5. Заборонений для експлуатації ЛР діапазон знаходиться в межах  $0 \leq U_{пр} \leq 0,125$ , де вартість одиниці світлової енергії постійно залишається нескінченно великою. Тому затримуватись у вказаному діапазоні немає ніякого сенсу. Найкраще його вилучити з алгоритму регулювання світлового потоку шляхом миттєвого вимкнення (ввімкнення) від (до) напруги мережі або пройти за найкоротший час.

6. Максимум світлової енергії, яку може генерувати базова ЛР, завжди має місце при  $U_{пр} = 0,7$  незалежно від потужності ЛР.

7. Виключно для дискретного регулювання світлового потоку [7,8] окремих світильників найкраще підходять т. **B, C, D, E, G, K** і **F** (рис. 5), в яких світловий потік зменшується в 1,7; 3; 3,7; 5,4; 9,7; 19 і 75 разів, а середня тривалість горіння збільшується в 7,37; 21,6; 26,2; 31,6; 47,2; 56,9 і 75 разів відповідно. В цьому випадку доцільно використовувати світлорегулятори з дискретно – стабілізованим способом регулювання світлового потоку типу DIMMO [8], які дозволяють реалізовувати режими експлуатації з мінімальною вартістю світлової енергії для різних значень  $q_n/q$  і

забезпечують добру електромагнітну сумісність із системою енергопостачання, як того і вимагає державний стандарт [9].

8. Для **плавного** регулювання світлового потоку ЛР найкраще використовувати діапазон напруг від  $U_n$  до  $0,54 \cdot U_n$ . При необхідності збільшення глибини регулювання світлового потоку вказаний діапазон може бути розширений до  $0,33 \cdot U_n$ . Експлуатація ЛР від напруг мережі менше  $0,33 \cdot U_n$  економічно не виправдана.

*Перспективою подальшого розвитку роботи є проведення подібного роду досліджень для розрядних джерел світла низького та високого тиску.*

*In work power efficiency of regulation of a light stream of incandescent lamps is investigated from the point of view of cost of unit of a quantity of light. Is established, that all set of possible virtual values of terminal voltage of incandescent lamps can be divided into five ranges: high, average and low power efficiency of process of regulation of a light stream with allocation unprofitable and forbidden, for use in algorithms of regulation of a light stream, ranges. Corresponding recommendations for developers of regulators of a light stream for incandescent lamps are formulated.*

### **Література**

1. Энергобережения. Законодательство та норми: Збірник № 1. – Миколаїв. : ЮИКК, 1998. – 199 с.
2. Вернер В. Интеллектуальная система управления внутренним освещением // Светотехника. – 1993. – № 4. – С. 15 – 19.
3. Энергосбережение в освещении / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак. – 1999. – 264 с.
4. А.Ваккер, С.Мюллер. Источники света: ситуация 2000 // Светотехника. – 2001. – № 2. – С. 11 – 13.
5. ГОСТ 2239-79 Изм.№1 (1982), №2 (1983), №3 (1985), №4 (1987), №5,6 (1989),№7 (1991). Лампы накаливания общего назначения. Технические условия.
6. Пляскин П.В., Федоров В.В., Буханов Ю.А. Основы конструирования электрических источников света. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
7. Банников В. Светорегулятор со ступенчатым регулированием. // Радио. – 1998. – № 9. – С. 42 – 43.
8. Новый емкостной светорегулятор DIMMO // Светотехника. – 1998. – № 5. – С. 38 – 39.
9. ГОСТ 13109 – 79. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 34 с.

*Одержано 21.03.2005 р.*