УДК 621.32.001.66

М.Тарасенко, канд. техн. наук; В.Гончар, канд. техн. наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАМП РОЗЖАРЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ДОВІЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

В роботі описано математичну модель ламп розжарення, використання якої дозволяє визначати як технічні, так і експлуатаційні інтегральні параметри ламп розжарення при довільних значеннях напруги мережі. Це дає можливість оцінювати енергетичну ефективність експлуатації ламп розжарення в системах регулювання світлового потоку або при відхиленнях напруги мережі від номінальних значень при аналізі електричних кіл довільної конфігурації.

N.Tarasenko; V.Gonchar

CALCULATION TECHNICAL AND OPERATIONAL PARAMETERS OF INCANDESCENCE LAMPS IN ELECTRIC NETWORK OF THE ANY CONFIGURATION

In work is considered the algebraic mathematical model of incandescent lamps which uses allows to define electric and lighting characteristics of incandescent lamps at any values of a voltage of a network. It enables to estimate power efficiency of operation of incandescent lamps in regulating systems of a lighting stream at deviations of a mains voltage from rating values.

Умовні позначення

$Uпр = Uл / Uлн$	-	зведена до номінального значення, згідно з [6], напруга на лампі розжарення (ЛР);
$Нпр = Нл / Нлн$	-	зведена до номінального значення, згідно з [6], світлова віддача ЛР;
$Рпр = Рл / Рлн$	-	зведена до номінального значення, згідно з [6], потужність ЛР;
$\tau_{пр} = \tau_л / \tau_{лн}$	-	зведена до номінального значення, згідно з [6], середня тривалість горіння ЛР;
$Uл$	-	напруга на ЛР, відмінна від номінального значення, В;
$Нл, Рл, \tau_л$	-	світлова віддача (лм/Вт), потужність (Вт) та середня тривалість горіння ЛР (год) при напругах, відмінних від номінального значення;
$Uлн, Нлн, Рлн, \tau_{лн}$	-	номінальні значення напруги (В), світлової віддачі (лм/Вт), потужності (Вт) та середньої тривалості горіння ЛР (год.), згідно з [6], відповідно;
i	-	порядковий номер рівня напруги мережі, який прикладається до ЛР під час експлуатації в реальних умовах;
$к$	-	кількість рівнів напруги мережі, які прикладаються до ЛР протягом часу експлуатації, починаючи з моменту ввімкнення до виходу ламп з ладу;
n_i	-	число, яке показує, яку частину часу ЛР горить в межах кожного з **к**-тих рівнів напруги мережі;
$\tau_р, Р_р, Ф_р$	-	реальні (середньозважені) значення середньої тривалості горіння (год.), потужності (Вт) та світлового потоку (лм) ЛР при їх експлуатації від різних за рівнем значеннях напруги мережі відповідно;
$\tau_i, Р_i, Ф_i$	-	середня тривалість горіння, потужність та світловий потік ЛР для **і** – того рівня напруги на лампі в процентах від номінальних значень відповідно, %.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Лампи розжарення (ЛР) належать до найдешевших, найбезпечніших і наймасовіших джерел світла. Їх найпростіше використовувати в різноманітних системах регулювання світлового потоку в унісон зі зміною природного освітлення шляхом простої зміни напруги на затискачах. Це дає можливість заощадити певну кількість електроенергії. Для цього в систему управління освітленням достатньо ввести фотоелемент для контролю освітленості у приміщенні. Тільки одна ця функція дозволяє економити енергію за рахунок відсічки так званого

"надлишку освітленості". На практиці це може виглядати так: якщо задана мінімальна освітленість у приміщенні складає, наприклад, 500 лк, то відразу після встановлення нових ламп вона може складати 750 лк і більше. "Надлишок" в освітленості не створює додаткових зручностей, але на його створення витрачається від 15 до 25 % електроенергії. Тобто, лише за рахунок зменшення світлового потоку ламп на початку їх терміну експлуатації можна заощадити до 25 % електроенергії [1]. Але для більш точного теоретичного обрахунку економічної ефективності експлуатації ЛР в режимах, які відрізняються від номінальних, необхідна певна сукупність математичних виразів, які б дозволяли це зробити.

Аналіз літературних джерел та публікацій [1,2,3,4,5] показав, що сьогодні при аналізі електричних кіл із ЛР останні найчастіше замінюються еквівалентними резисторами з простим зазначенням того, що в номінальному робочому режимі їх гарячий опір у 8-13 раз перевищує холодний, або застосовують диференційні математичні моделі ЛР, які дозволяють визначати електричні та світлотехнічні параметри ламп. Але їм притаманна складність виразів і значні похибки при визначенні технічних та експлуатаційних параметрів ЛР при експлуатації в режимах, відмінних від номінальних. Щодо математичних моделей, які б дозволяли достовірно визначати середню тривалість горіння ЛР в різноманітних режимах експлуатації, то вони взагалі відсутні.

Саме тому ***метою даної статті*** і стала розробка алгебраїчної математичної моделі ЛР, яка б дозволяла з достатньою для практики точністю визначати технічні та експлуатаційні параметри ламп, включаючи і середню тривалість горіння, в різноманітних режимах роботи (імітації добових змін освітленості землі, а саме: при заході сонця, вночі, на світанку, вдень; зміні яскравості горіння ЛР в світлофорних постах з метою виключення помилкового кольорosприйняття – вдень яскравіше, вночі тьмяніше тощо) і схемах ввімкнення (однопівперіодного випрямлення; регулювання світлового потоку; послідовного, паралельного та змішаного з'єднання ЛР) .

ЛР належать до нелінійних елементів, основні характерні залежності яких в широкому діапазоні напруг мережі можна описати системою алгебраїчних рівнянь. Як показали експериментальні дослідження, проведені в світлотехнічній лабораторії ОСП Корпорація "Ватра", згадана система алгебраїчних рівнянь стає універсальною (дійсною для всієї гами потужностей і діапазонів напруг ламп розжарення загального призначення [6]) в тому випадку, коли всі залежності зведені до номінальних значень відповідних параметрів. При цьому повна система алгебраїчних рівнянь має наступний вигляд :

$$Hпр = 0,232 \times (Uпр)^3 + 0,441 \times (Uпр)^2 + 0,382 \times Uпр - 0,0521, \quad (для\ ЛР\ P=15-75\ Вт);$$
$$Hпр = -0,48 \times (Uпр)^3 + 1,904 \times (Uпр)^2 - 0,453 \times Uпр + 0,0286, \quad (для\ ЛР\ P=100-1000\ Вт);$$

$$Pпр = -0,305 \times (Uпр)^3 + 1,114 \times (Uпр)^2 + 0,192 \times Uпр;$$

$$\tau_{пр} = 132,525 \times Uпр + 118,866, \quad (0,125 \le Uпр \le 0,725);$$
$$\tau_{пр} = 249,481 \times (Uпр)^3 - 445,8 \times (Uпр)^2 + 123,4 \times Uпр + 72,573, \quad (0,725 \le Uпр \le 0,900);$$
$$\tau_{пр} = 1/(Uпр)^{14}, \quad (0,9 \le Uпр \le 1,1).$$

Для тих випадків, коли на ЛР на певний час подаються різні значення напруги мережі (наприклад, при застосуванні систем регулювання світлового потоку або відхиленнях напруги мережі від номінальних значень, коли доцільно користуватися упорядкованими графіками напруги – гістограмами, які показують який процент від загального часу має місце той чи інший рівень напруги [7]), реальні (середньозважені) значення середньої тривалості горіння ($\boldsymbol{\tau_p}$), потужності (***Pp***) та світлового потоку (***Фр***) ламп слід визначати за формулами :

$$\tau_p = \tau_н \times \sum_{i=1}^{к} n_i \;/\; \sum_{i=1}^{к} [(n_i \times 100\%)/\tau_i]; \qquad Рр = Рн \times \sum_{i=1}^{к} n_i \;/\; \sum_{i=1}^{к} [(n_i \times 100\%)/P_i];$$

$$Фр = Фн \times \sum_{i=1}^{к} n_i \;/\; \sum_{i=1}^{к} [(n_i \times 100\%)/Ф_i].$$

Порівняння результатів розрахунків за вищенаведеними формулами з експериментальними даними показало, що похибка не перевищує 10% при стандартному відхиленні менше 0,01 для згаданих нами функцій.

Застосування залежностей *Нпр = φ (Uпр) та Рпр = ψ (Uпр)* дозволяє проводити розрахунки електричних і світлотехнічних параметрів ЛР при послідовному та послідовно-паралельному їх з'єднанні. Номінальні напруги та потужності ЛР, включених в електричне коло будь-якої конфігурації, можуть мати довільні значення. Розрахунки електричних кіл з ЛР найкраще проводити графоаналітичним способом, згідно з [8], в наступній послідовності.

1. На основі застосування рівнянь *Нпр = φ (Uпр) та Рпр = ψ (Uпр)* для певних значень Uпр знаходимо відповідні значення Iпр з кроком 0,02 (0,1) в діапазоні зведених напруг 0…0,1 (0,1…1,0)

$$Iпр = Рпр / Uпр.$$

2. Переходимо від зведених значень *Uпр, Iпр* до конкретних значень напруг і струмів ЛР, включених в електричне коло, застосувавши формули

$$Uл = Uлн \times Uпр \;\; (В); \qquad Iл = Iлн \times Iпр \;\; (А).$$

3. За отриманими конкретними даними в п.2 будуємо реальні вольт-амперні характеристики (ВАХ) для всіх ЛР, які включені в електричне коло.

4. Для визначення істинних значень струмів, які протікають у заданому електричному колі через ЛР, та напруг на їх затискачах будуємо допоміжні ВАХ :

а) при послідовному сполученні ЛР - це залежність сумарної напруги на лампах від струму в електричному колі. У зв'язку з тим, що в нерозгалуженому електричному колі струм, який протікає через лампи, один і той самий, побудова допоміжної ВАХ $(U_{Л1}+U_{Л2}+...+U_{ЛN}) = f(I_Л)$ здійснюється шляхом сумування напруг $U_{Л1}+U_{Л2}+...+U_{ЛN}$ при однакових значеннях струму;

б) при паралельному сполученні ЛР напруга на їх затискачах одинакова і треба будувати допоміжну характеристику $U_Л = F(I_{Л1}+I_{Л2}+...+I_{ЛN})$ тобто залежність напруги від сумарного струму. Для побудови цієї характеристики необхідно сумувати струми ЛР при одних і тих самих значеннях напруги;

в) при змішаному сполученні ЛР загальну допоміжну ВАХ кола відносно затискачів джерела живлення будуємо наступним чином: спочатку будуємо допоміжну ВАХ для паралельно сполучених ЛР, потім для послідовно сполучених ЛР і, нарешті, загальну допоміжну ВАХ усього кола шляхом сумування абсцис допоміжних ВАХ при послідовному й паралельному сполученні при одних і тих самих значеннях струму.

5. За відомими загально допоміжній ВАХ змішаного сполучення ЛР, допоміжним ВАХ послідовно та паралельно сполучених ЛР та реальним ВАХ кожної з ввімкнених ЛР визначаємо дійсні значення струмів, які протікають через ЛР, та напруги на їх затискачах:

а) при послідовному сполученні ЛР за відомим значенням напруги мережі за допоміжною ВАХ визначаємо струм, який протікає через ЛР (струм кола). Відоме значення струму кола дає можливість визначити за реальними ВАХ ЛР конкретні значення напруг на їх затискачах;

б) при паралельному сполученні ЛР напруга на всіх лампах однакова, і це дає можливість визначати за допоміжною ВАХ кола струм джерела живлення та за реальними ВАХ ламп дійсні струми ввімкнених ламп;

в) при змішаному сполученні ЛР за загальною допоміжною ВАХ і заданій напрузі мережі спочатку визначаємо загальний струм, який споживається з мережі і протікає через послідовно з'єднані ЛР. Потім за допоміжними ВАХ паралельно і послідовно сполучених ЛР і відомому загальному струмі кола визначаємо напруги на послідовно та паралельно з'єднаних ЛР. Після цього за реальними ВАХ ЛР і відомими напругами на послідовно та паралельно сполучених лампах визначаємо струми, які протікають через кожну з ламп.

6. За відомими струмами і напругами на ЛР визначаємо реальні та зведені потужності кожної з ламп, їх світлові віддачі (світловий потік) та середні тривалості горіння. На основі отриманих даних робимо висновки стосовно доцільності застосування тієї чи іншої схеми ввімкнення ЛР.

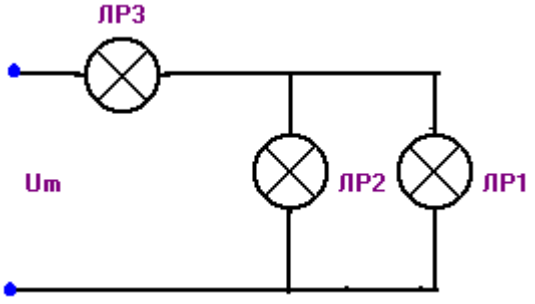

Рисунок 1 - Електрична схема ввімкнення ламп розжарення.

Наприклад. Визначити технічні та експлуатаційні параметри ламп розжарення ЛР1, ЛР2, ЛР3 в схемі рис. 1. ЛР1 15 Вт / 220 В; ЛР2 40 Вт / 220 В; ЛР3 100 Вт / 220 В

Розв'язок. 1. Задаємося значеннями *Unp,* знаходимо за вищенаведеними формулами *Pnp* та *Inp* і заносимо результати розрахунків в табл. 1

Таблиця 1 - Зведені значення електричних величин ЛР загального призначення

Unp	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Pnp	0,0037	0,0105	0,0215	0,0315	0,043	0,1	0,17	0,25	0,34	0,45	0,57	0,70	0,84	1,0
Inp	0,184	0,2625	0,3583	0,3938	0,43	0,5	0,57	0,62	0,68	0,75	0,81	0,87	0,93	1,0

2. Переходимо від зведених значень струму і напруги для кожної із заданих ЛР до дійсних і заносимо результати розрахунків у табл. 2

Таблиця 2 - Дійсні значення електричних величин ЛР загального призначення в схемі рис.1

Uл,В	4,4	8,8	13,2	17,6	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220
	Для ЛР1 потужністю 15 Вт із номінальним струмом 68,18 мА													
Iл,мА	12,5	17,9	24,4	26,8	29	34,2	38,7	42,5	46,9	51,2	55,5	59,8	63,9	68,2
	Для ЛР2 потужністю 40 Вт із номінальним струмом 181,18 мА													
Iл,мА	33,3	47,6	64,9	71,3	77,2	90,9	103	113	124,7	136,2	147,5	158,8	170	181,2
	Для ЛР1 потужністю 100 Вт із номінальним струмом 454,54 мА													
Iл,мА	83,6	119,3	168,9	179	193,7	228,2	258,3	283,6	313	341,6	370	398,3	426,4	454,5

3. За даними табл. 2 будуємо реальні ВАХ ЛР потужністю 15 Вт, 40 Вт, 100 Вт (див. рис. 2).

4. Будуємо допоміжну ВАХ для паралельно сполучених ламп ЛР1 та ЛР2 $U_Л = F(I_{Л1}+I_{Л2})$, тобто залежність напруги від сумарного струму, сумуючи струми згаданих ЛР при одних і тих самих значеннях напруги. На рис. 1 - це крива (ЛР1+ЛР2).

5. Будуємо загальну допоміжну ВАХ усього кола шляхом сумування абсцис допоміжної ВАХ паралельно сполучених ЛР (ЛР1+ЛР2) і ВАХ послідовно під'єднаної до них ЛР3 при одних і тих самих значеннях струму. На рис. 1 - це крива (ЛР1+ЛР2)+ЛР3.

6. З точки, розташованої на осі ординат, на рівні 220 В проводимо пряму, паралельну осі абсцис до перетину із загальною допоміжною ВАХ усього кола в точці

N. З точки **N** опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис до перетину з нею в точці **M**. Відрізок **OM** буде визначати струм в лампі ЛР3 – $I_{ЛР3}$ = 220 мА. Точка **V**, перетин перпендикуляра **NM** із допоміжною ВАХ паралельно сполучених ламп (ЛР1+ЛР2), дає можливість визначити напругу на цих лампах $U_{ЛР1} = U_{ЛР2}$ = **MV** = 180 В ($U_{ПР}$ =0,818) та напругу на лампі ЛР3 $U_{ЛР3}$ = **VN** = 40 В ($U_{ПР}$ = 0,182).

7. З точки **V** проводимо пряму, паралельну осі абсцис. Ця пряма перетне ВАХ ЛР2 у точці **R**, ВАХ ЛР1 у точці **Z** та вісь ординат у точці **T**. Відрізок **TZ** буде визначати струм в ЛР1 $I_{ЛР1}$ = 60 мА, а відрізок **TR** – струм в ЛР2 $I_{ЛР2}$ = 160 мА.

8. Визначаємо потужності, світлові віддачі, світлові потоки та середні тривалості горіння ЛР, ввімкнених в схему рис. 1. Результати зводимо в табл. 3.

Таблиця 3 - Дійсні технічні та експлуатаційні параметри ЛР в схемі рис. 1

Номер ЛР	Рл, Вт	Рл, % *	Нл, лм/Вт	Нл, % *	Фл, лм	Фл, % *	$\tau_л$, год	$\tau_л$, %*
ЛР1	10,8	72	4,77	68,2	51,5	49,1	11660	1160
ЛР2	28,8	72	6,82	68,2	196,4	49,1	11660	1160
ЛР3	8,8	8,8	0,08	0,64	0,7	0,05	95000	9500
* - процент від номінального значення параметру								

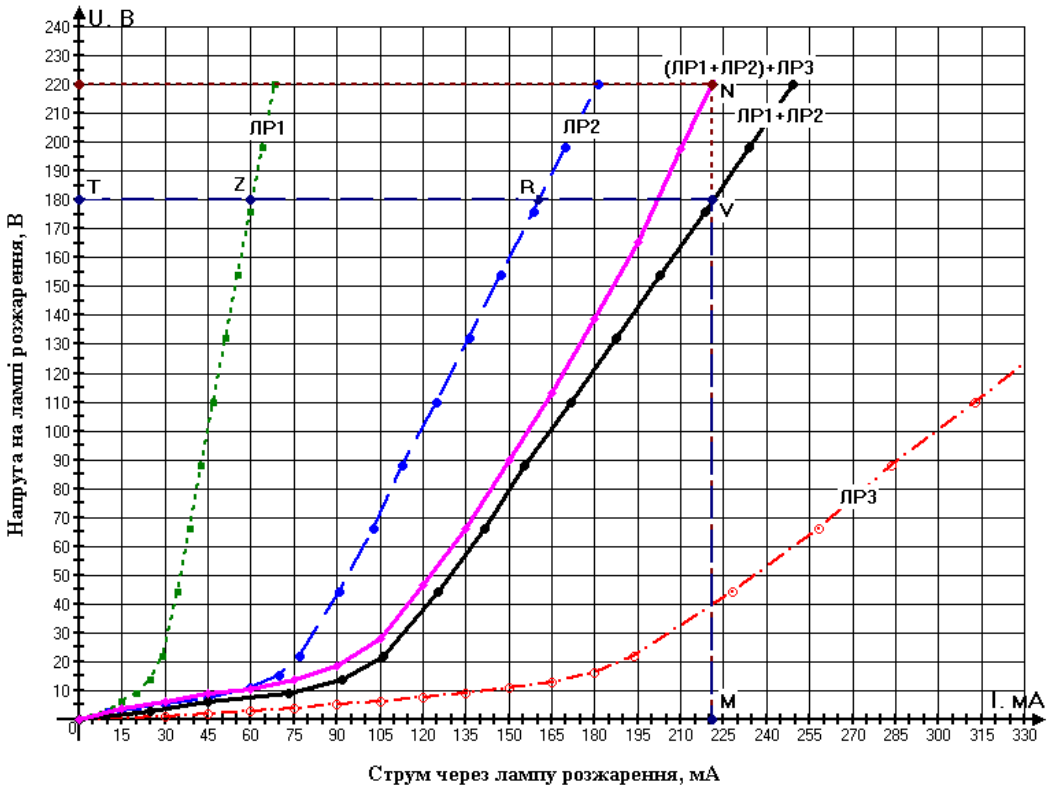

Рисунок 2 - Реальні вольт-амперні характеристики ламп розжарення.

Висновки.

1. В схемі рис. 1 середня тривалість горіння ЛР1 та ЛР2 зросте в 11,6 раза, а ЛР3 – в 95 раз. При цьому лампи ЛР1 та ЛР2 будуть горіти напів'яскраво, а ЛР3 взагалі не буде випромінювати світла. Для практичного застосування така схема ввімкнення навряд чи буде цікавою.

2. Зведення всіх залежностей до номінальних значень відповідних параметрів дозволило отримати універсальну адекватну математичну модель ЛР із сукупності шести алгебраїчних рівнянь. Це дає можливість оцінювати енергетичну ефективність експлуатації ЛР у різноманітних схемах ввімкнення, системах регулювання світлового потоку та при відхиленнях напруги мережі від номінальних значень.

3. Запропонована інтерполяційна математична модель ЛР загального призначення досить зручна в користуванні і забезпечує прийнятну для практики точність розрахунків як технічних, так і експлуатаційних параметрів.

Перспективою подальших досліджень є створення подібних алгебраїчних математичних моделей для розрядних ламп низького та високого тиску.

Література

1. Энергосбережение в освещении / Под. ред. Ю.Б.Айзенберга. – М.:Знак, 1999. – 264 с.
2. ТАнтар А.И., Ужеловский В.А. Метод включения групп ламп накаливания, обеспечивающий повышении их надежности // Светотехника. – 2001. – №6. – С. 31-33.
3. Алексеев Е.Г., Харитонов А.В. Аппроксимация табличных функций для численного моделирования процессов в тепловых источниках оптического излучения // Светотехника. – 2003. – № 1. – С. 42.
4. Литвинов В.С. , Рохлин Г.Н. Тепловые источники оптического излучения (теория и расчет).- М.: Энергия, 1975. – 245 с.
5. Литвинов В.С. Оптимизация источников света массового применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
6. ГОСТ 2239 – 79 Изм. №1 (1982), №2 (1983), №3 (1985), №4 (1987), №5,6 (1989), №7 (1991). Лампы накаливания общего назначения. Технические условия. - М.: Госстандарт, 1979. – 34 с.
7. Кунгс Я.А. Автоматизация управления электрическим освещением. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: - М.: Высш. школа, 1978. - 528 с.

Одержано 16.11.2005 р.