

УДК 621.326

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

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ АКТИВНОГО ОПОРУ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З ТЕПЛОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СВІТЛА

У роботі розроблено методику розрахунку оптимального значення активного опору струмообмежувального елемента. Встановлено його залежність від потужності лампи. Визначено ефективність застосування активних струмообмежувальних опорів для зменшення амплітуд перехідних струмів у теплових джерелах світла при комутаціях. Визначено граничну частоту роботи теплових джерел світла в режимах частих вмикань при мінімально можливих значеннях амплітуди перехідних струмів.

M. Tarasenko, V. Koval

METHOD OF CALCULATION OF ACTIVE RESISTANCE OF LIMITING CURRENT ELEMENT IN ELECTRIC CIRCLES WITH THERMAL SOURCES OF LIGHT

In work the method of calculation of optimum value of active resistance of limiting current element is developed. His dependence on power of lamp is set. Efficiency of application of active limiting current resistances is certain for reduction of amplitudes of transitional currents in the thermal sources of light at commutations. Maximum frequency of work of thermal sources of light in the modes of frequent inclusions at the minimum possible values of amplitude of transitional currents is certain.

Умовні позначення

R_x – холодний опір тіла розжарювання, Ом;

R_2 – гарячий опір тіла розжарювання $R_2 = U_{лр}^2 / P_{лр}$, Ом, ;

$U_{лр}$ – номінальне значення напруги на лампі розжарювання, В;

$P_{лр}$ – номінальне значення потужності лампи розжарювання, Вт ;

R'_2 – гарячий опір тіла розжарювання при послідовно увімкненому з нею струмообмежувальному резисторі ($R'_2 < R_2$), Ом;

$r(T)$ – опір тіла розжарювання при температурі Т, Ом;

R – опір струмообмежувального резистора, Ом;

$u_m(t)$ – напруга мережі живлення кола послідовно увімкнених лампи розжарювання і струмообмежувального резистора, В;

t – біжучий час, сек.;

$F_L(T)$ – потужність, яка відводиться від тіла розжарювання внаслідок випромінювання, Вт ;

$P_r(T)$ – теплові втрати через газ, яким наповнена колба лампи розжарювання, Вт;

$C(T)$ – теплоємність тіла розжарювання при температурі Т, Дж/град;

C_1 – коефіцієнт, який враховує збільшення потужності лампи розжарювання за рахунок охолоджуючої дії електродів і гачків ($C_1 = 1,015-1,02$);

d – діаметр нитки тіла розжарювання, см;

L – розгорнута довжина нитки розжарювання, см;

ρ_T – питомий опір тіла розжарювання при температурі Т, Ом·см;

$\delta(T)$ – загальний коефіцієнт випромінювання спірального тіла розжарювання, який враховує втрати при багатократних відбиваннях всередині спіралі;

k_k – коефіцієнт кроку спіралі, ($k_k = 1, 3..2.0$);
 γ – густина вольфраму, $\gamma = 19,2 \text{ г/см}^3$;
 C_T – атомна теплоємність вольфраму, $\text{кал}\cdot\text{г}\cdot\text{м}\cdot\text{атом}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$;
 M_{eT} – енергетична світимість вольфраму при температурі T (К), Вт/см^2 ;
 M – атомна маса вольфраму, $M = 183,85 \text{ а.т.м.}$;
 $\varphi(T)$ – функція теплопровідності газу та температури тіла розжарювання,
 $\varphi(400) = 0,08 \text{ Вт/см}$;
 d_1 – діаметр застійного шару навколо тіла розжарювання, см;
 p_T – тиск газів у колбі лампи розжарювання при горінні, $p_T = 800 \text{ мм рт. ст.}$;
 T_1 – середня температура газу, яким наповнена колба, $T_1 = 400 - 450 \text{ К}$;
 C – стала Сезерланда, пов'язана з в'язкістю газу, К;
 A – стала, яка залежить від природи газу, $^\circ\text{C}$;
 f_{sp} – гранична частота вмикань лампи розжарювання в режимах частих вмикань, Гц ;
 k_1, τ_1 – кидок струму і тривалість першого перехідного процесу при вмиканні лампи розжарювання, сек.;
 k_2, τ_2 – кидок струму і тривалість другого перехідного процесу при вмиканні лампи розжарювання, сек.;
 τ_3 – тривалість перехідного процесу при вимиканні лампи розжарювання, сек.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Під час перехідних процесів (ПП) при вмиканні електричних кіл з тепловими джерелами світла (ТДС) відбувається значне перевищення перехідного струму в порівнянні з номінальним. Це призводить до зниження середнього терміну горіння (СТГ) ТДС в 3-5 разів. Особливо гостро ця проблема характерна для світлофорних постів, у яких лампи розжарювання (ЛР) працюють у режимах частих вмикань (РЧВ). Саме тому залишається актуальним питання оптимізації кількісних параметрів перехідних процесів (ПП) у колах з ТДС, а особливо, в ЛР загального призначення, які є найбільш поширені з них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав [1,2,3,4,5], що існує багато способів обмеження амплітуди перехідних струмів (кидків струмів) у колах з ЛР, різними за своєю складністю і ефективністю. Перевага надана резисторам, які вмикають послідовно з ЛР і після закінчення ПП (для усунення додаткових втрат потужності) шунтують ключем. Для того, щоб уникнути складних схем шунтування резисторів, у [3] запропоновано замість лінійних резисторів застосовувати терморезистори з від'ємним температурним коефіцієнтом опору. Опір струмообмежувального резистора (СР) пропонується приймати рівним 0,7 від номінального значення гарячого опору ЛР [1] ($R_2 = U_{ЛР}^2 / P_{ЛР}$), або таким, щоб сумарний опір послідовного кола дорівнював R_2 .

При цьому залишилися без уваги питання, пов'язані з визначенням: а) методики розрахунку оптимальних значень величини опору СР для існуючої гами потужностей ЛР; б) теоретичним шляхом картини перехідних процесів при подачі напруги мережі і шунтування СР; в) граничної частоти ввімкнення ЛР в РЧВ. Саме тому ці питання і стали метою даної роботи.

Обмеження перехідних струмів у колах з ЛР при застосуванні СР відбувається наступним чином. Після замикання ключа K_1 (рис. 1) до послідовно увімкненої ЛР з СР прикладається постійна напруга живлення 220 В. У результаті цього виникає перший ПП з кидком струму k_1 . Після завершення першого ПП замикається ключ K_2 і до ЛР прикладається номінальна напруга живлення та виникає другий ПП з кидком струму k_2 . Величина кидків струму залежить від величини опору СР та гарячого опору ЛР. При зростанні опору СР k_1 зменшується, а k_2 збільшується. Кидки струму k_1 та k_2 взаємозалежні. При зростанні першого зменшується другий і навпаки. Тому потрібно підібрати величину опору СР так, щоб кидки струму k_1 та k_2 були рівні. В інших

випадках один з кидків струму матиме більше значення, що негативно впливатиме на СТГ ЛР. На цьому ґрунтується запропонована нами методика розрахунку опору СР.

Для розрахунку оптимального опору СР для будь-якої ЛР застосовано баланс потужностей системи послідовно увімкнених ЛР і СР [6]:

$$C_1 \cdot \frac{u_m^2(t)}{(r(T)+R)^2} \cdot r(T)dt = F_L(T) + P_r(T) + C(T)dT. \quad (1)$$

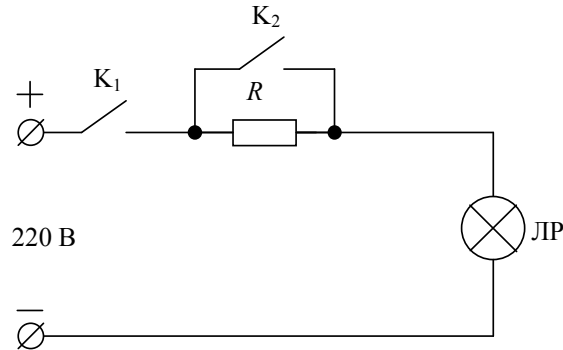


Рисунок 1 - Схема електричного кола для обмеження перехідних струмів у колах з ЛР

Величини $r(T)$, $F_L(T)$ і $C(T)$ залежать від температури ТР і обчислюються за формулами (2) [3,6]:

$$\begin{aligned} r(T) &= \rho_T \cdot \frac{4 \cdot L}{\pi \cdot d^2}; \\ F_L(T) &= \delta(T) \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot M_{eT}; \\ C(T) &= \frac{4.18 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L \cdot \gamma \cdot C_T}{4 \cdot M}. \end{aligned} \quad (2)$$

Теплові втрати через газ $P_r(T)$ залежать від температури ТР і виду газового наповнення. Малопотужні ЛР загального призначення [7] виготовляють вакуумними ($P_r(T) = 0$) або ж наповнюють технічним аргоном (86 % Ar+14 % Kr), криптоном (90 % Kr+10 % N₂). У проведених розрахунках визначатимемо $P_r(T)$ в суміші 86 % Ar і 14 % N₂. Хоча при потребі можна розрахувати $P_r(T)$ і для іншої суміші газів.

Теплові втрати через газ $P_r(T)$ обчислюються за формулою [3]:

$$P_r(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{d_1}{d}} (\varphi(T) - \varphi(400)), \quad (3)$$

$$d_1 = 2 \cdot \left[A \cdot d^{0.19} \cdot \left(\frac{(T - T_1)^{0.5}}{p \cdot (T + T_1 + 2 \cdot C) \cdot \sqrt{T - T_1}} \right)^{0.54} \right] + d. \quad (4)$$

Значення А і С [8] для деяких газів наведено в табл. 1.

Залежність величин ρ_T , C_T і M_{eT} подано в літературі у вигляді таблиць [4,8] і емпіричних формул [9], які їх апроксимують:

$$\begin{aligned} \rho_T &= 6,123 \cdot 10^{-9} \cdot T^{1,2}; \\ C_T &= \begin{cases} 5,87 + 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot T, & 293 < T < 1140 \\ 4,71 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T, & 1140 < T < 3600 \end{cases}; \\ M_{eT} &= 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \cdot (0,45 - 0,61 \cdot e^{-0,58 \cdot 10^{-3} \cdot T}). \end{aligned} \quad (5)$$

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів А і С

Газ чи суміш газів	A	C, K
N ₂	0,163	383
Ar	0,163	443
86% Ar+14% N ₂	0,163	437
Kr	0,120	461
Xe	0,094	525

Використовуючи сучасні методи апроксимації табличних даних, отримано емпіричні формули для загального коефіцієнта випромінювання спіралі ($\delta(T)$) і коефіцієнта для розрахунку втрат через газ $\varphi(T)$. Дані формули і похибки апроксимації подано в табл. 2.

Таблиця 2 - Емпіричні формули для величин $\varphi(T)$ і $\delta(T)$

Фізична величина	Функція	Стандартна похибка, %
Загальний коефіцієнт випромінювання спірального ТР	$\delta(T) = 0.98 - 1,28 \cdot 10^{-4} \cdot T$ (для $k_K = 1,3$)	0,003
	$\delta(T) = 1,644 - 0.112 \cdot \ln T$ (для $k_K = 1,5$)	0,006
$\varphi(T)$ для суміші 86 % Ar і 14 % N ₂	$\varphi(T) = 4,14 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,615}$	0,015
$\varphi(T)$ для Kr	$\varphi(T) = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,68}$	0,019
$\varphi(T)$ для Xe	$\varphi(T) = 2,28 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1,84}$	0,017

Для визначення миттєвих значень температури T та опору $r(T)$ ТР при живленні послідовно увімкнених ЛР і СР постійною чи змінною напругою запишемо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \frac{C_1 \cdot \frac{u_m^2(t)}{(r(T)+R)^2} \cdot r(T) - F_L(T) + P_r(T)}{C(T)} \\ \frac{du_m}{dt} = f(t) \end{cases} \quad (6)$$

При формуванні даної системи рівнянь не враховані втрати потужності на елементах в СР, який вмикається на час від 0,2 до 1,2 с. Систему диференціальних рівнянь (6) розв'язано методом Рунге-Кутта четвертого порядку [10].

На основі даної системи диференційних рівнянь на алгоритмічній мові Паскаль написано програму обчислення оптимального опору СР, ввімкненого послідовно з ЛР для наступних умов: 1) ТР ЛР спіральне чи біспіральне; 2) колба наповнена газовою сумішшю 86 % Ar і 14 % N₂; 3) залежність загального коефіцієнта випромінювання ТР від температури взято для коефіцієнта кроку $k_K = 1,5$. Вихідними даними для розрахунку є діаметр нитки ТР (d) та її розгорнута довжина (L).

Алгоритм роботи даної програми складається з декількох етапів. Першочергово визначається холодний опір ТР $R_x = r(293)$ (2). Потім програмою задається опір СР, рівний нулю, та за системою диференціальних рівнянь (6), після закінчення ПП, визначається гарячий опір ТР R_2 . В залежності від різниці між R_x та R_2 визначається

початкове значення опору СР R . Поступово, за методом послідовних наближень, перевіряється умова рівності кидків струму k_1 та k_2 :

$$R_x + R = R'_2, \quad (7)$$

Якщо умова (7) справджується з похибкою 0,1 %, розрахунок припиняється та програма відображає знайдене значення опору СР.

У проведених розрахунках напруга живлення прийнята постійною ($U(0) = 220$ В, $f(t) = 0$). Це спрощує проведення розрахунків і не впливає на їх точність. На змінному струмі миттєві значення опору ТР мають коливальний характер і їх амплітуда залежить від потужності лампи.

В табл. 3 наведено габаритні розміри ТР та оптимальні значення опору СР для найбільш поширених ЛР.

Таблиця 3 - Габаритні розміри ТР і обчислене значення СР

P , Вт	25	60	100	200
d , см	0,00175	0,0031	0,0043	0,0068
L , см	70,8	90	104	128,8
R , Ом	1337	566	361	175

Для визначення величини похибки даних розрахунків проведено експериментальні дослідження ПП при вмиканні ЛР потужністю 25, 60, 100, 200, 300 і 1000 Вт послідовно з СР згідно з рис. 2. Дослідження виконувались на віртуальному вимірювальному комплексі на базі персонального комп'ютера (ПК) [11]. Після замикання ключа K_1 (рис. 2) на коло СР-ЛР подавалась змінна напруга з діючим значенням 220 В. Після закінчення першого ПП ключем K_2 до ЛР подавалась номінальна напруга. Керування замиканням ключів K_1 і K_2 проводилось через паралельний порт ПК, що забезпечило високу швидкодію і точність замикання. Миттєві значення напруги живлення (u_m), напруги на лампі (u_n) і струму лампи (i_n) надходили до ПК від датчиків D_1 , D_2 і D_3 , відповідно.

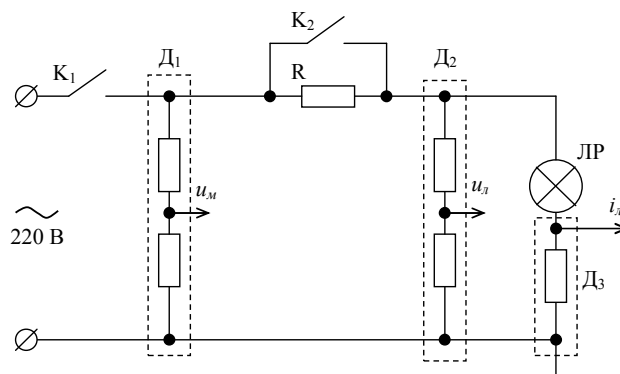


Рисунок 2 - Принципова електрична схема установки для дослідження впливу послідовно увімкненого СР на хід ПП в колах з ЛР

В результаті отримано низку осцилограм ПП при вмиканні послідовно з ЛР СР. Величина його опору обчислювалася так, щоб значення амплітуди перехідних струмів при замиканні ключів K_1 і K_2 були мінімально можливими й однаковими.

Під час досліджень перехідних процесів у схемі послідовно увімкнених ЛР і СР проводились спостереження за амплітудними значеннями струму i_{n+R} – першого (K_1 – замкнуто, K_2 – розімкнуто) і i_n – другого (K_2 – замкнуто) перехідних процесів (рис.3). Запис осцилограм починався із замиканням ключа K_1 у момент, коли напруга живлення мала початкову фазу $\varphi_n = 0^\circ$ або $\varphi_n = 90^\circ$. Замикання ключа K_2 відбувалося тільки після закінчення першого перехідного процесу. Таким чином, вимірювалось чотири значення

струму: $i_{л+R}(0^\circ)$ – струм першого перехідного процесу при $\varphi_n = 0^\circ$; $i_{л+R}(90^\circ)$ – струм першого перехідного процесу при $\varphi_n = 90^\circ$; $i_{л}(0^\circ)$ – струм другого перехідного процесу при $\varphi_n = 0^\circ$; $i_{л}(90^\circ)$ – струм другого перехідного процесу при $\varphi_n = 90^\circ$. При дослідженні ЛР різної потужності виявилось, що тривалість перехідних процесів зростає із зростанням потужності ЛР. Тому на рис. 3, для більшої наочності, наведено осцилограму перехідних процесів для лампи потужністю 25 Вт, для якої тривалість перехідних процесів найменша.

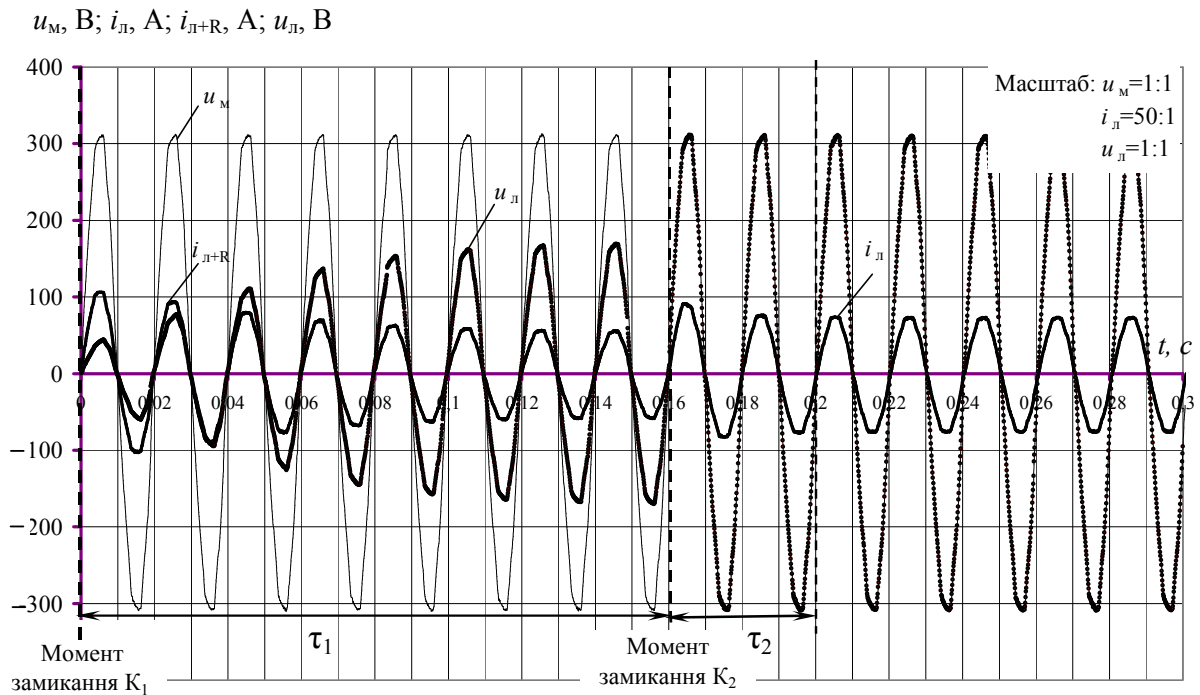


Рисунок 3 - Осцилограми ПП у колах рис.2 з ЛР Б 230-25 ($R = 1300 \text{ Ом}$)

Для дослідження залежності величини амплітуд перехідних струмів (кидків струмів) через ЛР від опоры послідовно увімкненого СР були зняті осцилограми перехідних процесів у схемах з ЛР зазначених вище потужностей. За отриманими осцилограмами побудовано графічні залежності кидків струму від величини СР. На рис. 4 наведено ділянки цих залежностей для випадків, коли кидки струмів через ЛР типу Б 230-25 під час першого і другого перехідного процесу були однакові. З рисунка видно, що найбільший кидок струму має місце при черговому замиканні ключів K_1 і K_2 у момент, коли початкова фаза напруги живлення $\varphi_n = 90^\circ$, що цілком зрозуміло. В даному випадку оптимальне його значення буде, коли кидки струмів першого і другого ПП однакові (точка b), при опорі послідовно увімкненого СР 1275 Ом. Враховуючи те, що при замиканні ключів K_1 і K_2 початкова фаза напруги мережі живлення може бути будь-яка і що допуск на опір виготовлених резисторів становить $\pm 5\%$, значення опоры СР для ЛР Б 230-25 має знаходитись у межах 1225 – 1387 Ом (область $b-c-d-a$ рис. 4). Для ламп інших потужностей значення опоры СР в точці b (рис. 4) і його межі значень визначено аналогічним чином (табл. 5).

Таблиця 4 - Кидки струму в ЛР з послідовно увімкненим СР

$P, \text{ Вт}$	25	60	100	200	300	1000
$i_{л \text{ max}}, \text{ А}$	0,212	0,49	0,735	1,42	2,35	7,4
$i_{л \text{ ном}}, \text{ А}$	0,144	0,358	0,592	1,16	1,94	6,43
$k_1 = k_2$	1,472	1,369	1,242	1,224	1,211	1,151

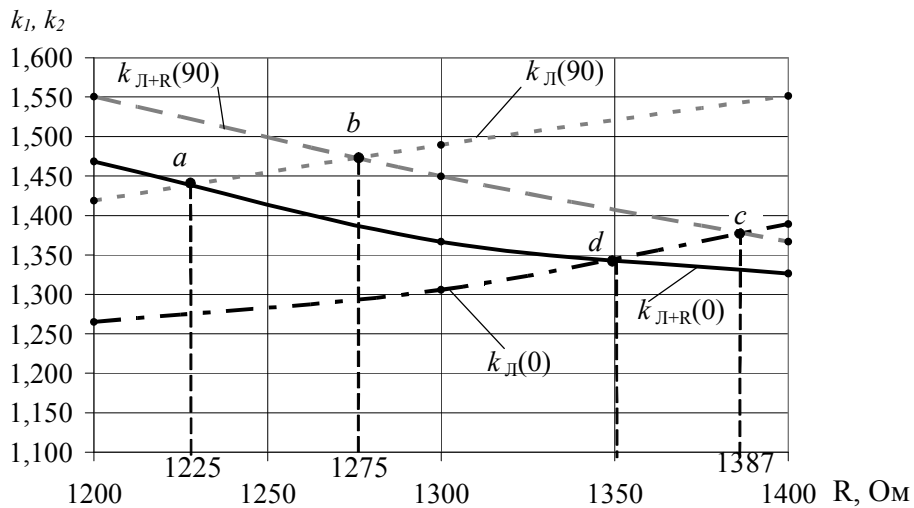


Рисунок 4 - Залежність величини кидків струму в ЛР Б230-25 від опору СР

В результаті проведених досліджень отримано діапазон опорів СР для досліджуваних ЛР (табл. 5). Також визначено оптимальне значення опору СР, при якому кидки струму при найбільш критичних умовах ($\varphi_n = 90^\circ$) є найменші. При порівнянні отриманих даних з результатами розрахунку (табл. 3) можна зробити висновок, що похибка розрахунків не перевищує 5 %.

Для того, щоб можна було швидко визначити оптимальне значення опору для ЛР інших потужностей, було побудовано його графічну залежність від потужності лампи (рис. 5), яку апроксимовано функцією (8):

$$R = \frac{31486,8}{P_l} + 17,1. \quad (8)$$

Таблиця 5 - Значення величин опорів струмообмежувальних резисторів, тривалостей перехідних процесів і граничних частот експлуатації ЛР в РЧВ

P, Вт		25	60	100	200	300	1000
R, Ом	Оптимальне значення	1275	540	345	172	115	48,5
	Діапазон значень	1225 – 1387	539 – 570	340 – 364	170 – 175	114 – 118	47,5-49,2
τ_1 , сек.		0,12	0,215	0,295	0,435	0,605	0,86
τ_2 , сек.		0,04	0,06	0,09	0,132	0,18	0,56
τ_3 , сек.		0,133	0,26	0,44	0,92	1,24	3,41
$f_{гр}$, Гц		3,41	1,87	1,2	0,67	0,51	0,2

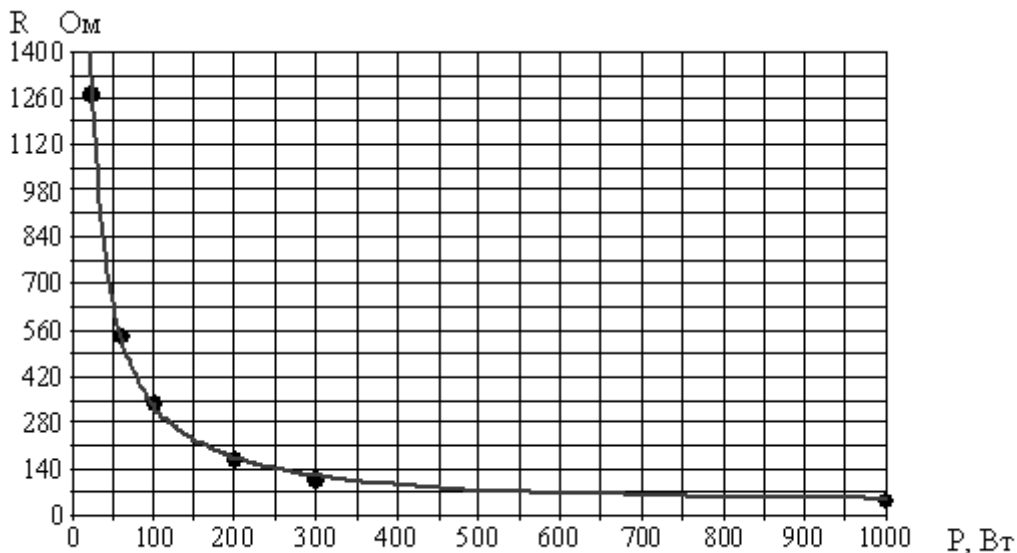


Рисунок 5 - Графічна залежність оптимального опору СР від потужності ЛР: ●●● – дослідні значення; — — — апроксимовані значення

Для роботи ЛР, з'єднаних послідовно з СР в РЧВ, потрібно знати, з якою граничною частотою $f_{зр}$ можна вмикати лампу в мережу, щоб світло від неї сприймалося як окремі спалахи. Очевидно, що ця частота обернено пропорційна сумарній тривалості перехідних процесів $\tau_1 + \tau_2$ і часу τ_3 (9), який потрібен для того, щоб температура ТР, починаючи з моменту відключення лампи від мережі живлення, впала до значень, при яких випромінювання світла припиняється. Тривалості першого τ_1 і другого τ_2 перехідних процесів визначені з осцилограм, подібних тим, що зображені на рис. 3 і зведені в табл. 5. Тривалості τ_3 визначені на підставі аналізу осцилограм зміни світлового потоку ЛР в фотометричній кулі при розмиканні ключа K_1 . Для зручності проведення розрахунків роботи ЛР в РЧВ залежність граничної частоти від потужності ЛР (табл. 5) апроксимована функцією (10):

$$f_{зр} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}; \quad (9)$$

$$f_{зр} = \frac{108}{P_{л}} + 0,15. \quad (10)$$

Висновки. В результаті проведеної роботи встановлено, що:

- розроблена методика обчислення опору СР може бути застосована для будь-якого типу й потужності ЛР;
- при порівнянні результатів розрахунків із дослідними даними використання системи диференціальних рівнянь (6) забезпечує отримання оптимальних значень опорів СР з достатньою для практики похибкою (похибка не перевищує 5 %);
- залежність СР від потужності ЛР носить гіперболічний характер – зі зростанням потужності лампи він зменшується (рис.5 і табл. 5);
- гранична частота вмикань ЛР з СР в РЧВ зменшується із збільшенням потужності лампи і визначається за формулою (10).

Перспективи подальших досліджень: оптимізація параметрів перехідних процесів попереднього підігрівання оксидних біспіральних електродів люмінесцентних ламп з метою підвищення СТГ останніх при експлуатації в РЧВ.

Література

1. Никитин В. Как продлить «жизнь» лампы накаливания // Радио. - 1988. – № 4. – С. 38-39.
2. Банников В. Защита электроосветительных приборов // Радио. - 1990. – № 12. – С. 53.
3. Бондаренко Э.Г., Киселева Н.П., Литвинов В.С. Терморезисторы для ламп накаливания // Светотехника, 1993. – № 2. – С. 4-5.

4. Литвинов В.С., Рохлин Г.Н. Тепловые источники оптического излучения (теория и расчет). - М.: Энергия, 1975. – 248 с.
5. Серов И.В. Применение лестничных фильтров для ограничения пускового тока ламп накаливания // Светотехника, 1999. – № 5. – С. 33–35.
6. Киселева Н.П. Методы расчета и исследование ламп накаливания, работающих в режимах частых включений. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05,09,07/МЭИ. – М., 1991. – 20 с.
7. ГОСТ 2239-79. Лампы накаливания общего назначения. Технические условия. – Взамен ГОСТ 2239-70; Введ. 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1994. –38 с.
8. Гуторов М.М. Основы светотехники и источника света. Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1968. – 392 с.
9. Киселева Н.П., Литвинов В.С. О способах увеличения срока службы и эффективности ламп накаливания в режимах частых включений // Светотехника, 1993. – № 4. – С. 8-10.
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
11. Тарасенко М.Г., Коваль В.П. Віртуальний вимірювальний комплекс для дослідження перехідних процесів в електричних колах довільної конфігурації // Ресстрація, зберігання і обробка даних. – 2006. – Т.8, №1. – С. 84–91.

Одержано 07.10.2008 р.