

$$I_S^2 = \frac{\pi^2}{16} d^4 \frac{G(T_S - T_0)}{\rho_0 [1 + \beta(T_S - T_0)]} \quad (4)$$

или

$$I_S^2 = Gk_1 d^4, \quad (5)$$

где d – диаметр проволочного плавкого элемента; G – передача тепла в радиальном направлении, приходящаяся на единицу объема и градус Цельсия; T_0 – температура окружающей среды; k_1 – константа, зависящая от физических свойств материала плавкого элемента.

Следует также заметить, что в случае короткого проводника выражение для I_s имеет вид

$$I_S^2 = k_2 d^4, \quad (6)$$

причем k_2 – константа, отличная от величины произведения $G \cdot k_1$.

Таким образом, при модернизации или разработке миниатюрных предохранителей в зависимости от поставленных перед разработчиком задач и имеющихся в наличии данных о предохранителе можно производить полный расчет ВТХ или, если этого достаточно, использовать теоретическую аппроксимацию данных характеристик. Однако приведенный выше метод расчета ампер-секундной характеристики не доступен для широкого применения на практике, а для его усовершенствования надо провести дополнительные исследования характеристик миниатюрных предохранителей.

1. Vermij L., Matteij A.I.M. Time-Current Characteristics of Miniature Fuses, ICEFA, 1987, pp. 122-126.

2. Iaspar I., P. van Rietschoten, Vermij L. A Theoretical Approximation of the Time-Current Characteristic of Miniature Fuses, ICEFA, 1991, pp. 100-102.

Получено 16.05.2002

УДК 621.327.534

Е.А.МВУДЖО

Харьковская государственная академия городского хозяйства

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНЫХ ПОТЕРЬ В ДРОССЕЛЕ НА ФОРМУ ТОКА В ЦЕПИ "РАЗРЯДНАЯ ЛАМПА – ИНДУКТИВНЫЙ БАЛЛАСТ"

Показана возможность учета активных потерь в балластном дросселе при расчете контура "РЛ – ПРА" новым методом на основе синус-квадратичной аппроксимации динамики проводимости лампы.

В работе [1] описана методика расчета параметров схемы стабилизации разрядной лампы с индуктивным балластом без активных по-

терь, основанная на теоретических рекомендациях работы [2]. Методика заключается в решении основного уравнения для рассматриваемой схемы с использованием временной зависимости активного сопротивления разрядной лампы на протяжении полупериода разряда на переменном токе промышленной частоты в виде

$$r_{\text{л}}(t) = \frac{R_0}{\sin^2 \omega t}, \quad (1)$$

причем параметр R_0 определяется как

$$R_0 = 1/G_0; \quad \bar{G} = G_0/2, \quad (2)$$

где G_0 – максимальное, а \bar{G} – усредненное значение проводимости лампы за полупериод тока.

Эта методика удобна для применения на стадии предпроектных исследований вновь разрабатываемых комплектов "РЛ – ПРА", на которой могут быть достоверно известны, как правило, действующие значения тока лампы $I_{\text{л}}$, напряжения на лампе $U_{\text{л}}$ и напряжения в сети $U_{\text{с}}$.

В настоящей работе указанная методика применена для исследования влияния активных потерь в балластном дросселе на характеристики тока в цепи "разрядная лампа – индуктивный ПРА". Такое исследование уместно также проводить на ранней стадии проектирования для установления допустимого значения омического сопротивления балласта R_{δ} , при котором форма тока в цепи еще удовлетворяет требованиям стандарта [3].

Основное уравнение для расчета рассматриваемой цепи может быть представлено в виде

$$L \frac{di_{\text{л}}}{dt} + R_{\delta} \cdot i_{\text{л}} + r_{\text{л}} \cdot i_{\text{л}} = V_{\text{с}} \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где $i_{\text{л}} = i_{\text{л}}(\omega t)$ определяет форму тока в цепи; L и R_{δ} – индуктивность и омическое сопротивление балласта соответственно.

Введя обозначения

$$\omega t = x, \quad \frac{i_{\text{л}}(\omega t)}{U_{\text{с}} \sqrt{2} / \omega L} = f(x), \quad \frac{R_0}{\omega L} = A, \quad \frac{R_{\delta}}{\omega L} = A', \quad (4)$$

после некоторых преобразований приведем (3) к виду

$$\sin^2 x \cdot f'(x) + A f(x) + A' \sin^2 x = \sin^2 x \cdot \sin(x + \varphi). \quad (5)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде ряда Фурье (с учетом симметрии 3-го рода, присущей функции $f(x)$):

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} [a_{2k+1} \cos(2k+1)x + b_{2k+1} \sin(2k+1)x]. \quad (6)$$

Используя элементарные тригонометрические формулы (типа $\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$ и т.п.), преобразуем (5) к виду

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{2}(2k+1)a_{2k+1} - \frac{1}{2}A'b_{2k+1} \right] \sin(2k-1)x - \left[\frac{1}{2}(2k+1)b_{2k+1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2}A'a_{2k+1} \right] \cos(2k-1)x + \left[-(2k+1)a_{2k+1} + 2Ab_{2k+1} + A'b_{2k+1} \right] \times \right. \\ \times \sin(2k+1)x + \left[(2k+1)b_{2k+1} + 2Aa_{2k+1} + A'a_{2k+1} \right] \cos(2k+1)x + \\ \left. + \left[\frac{1}{2}(2k+1)a_{2k+1} - \frac{1}{2}A'b_{2k+1} \right] \sin(2k+3)x + \left[-\frac{1}{2}(2k+1)b_{2k+1} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2}A'a_{2k+1} \right] \cos(2k+3)x \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

Применение известного метода гармонического баланса (последовательного приравнивания коэффициентов при $\sin x$, $\cos x$, $\sin 3x$, ...) приводит к следующей системе алгебраических уравнений для определения коэффициентов Фурье a_{2k+1} , b_{2k+1} :

$$\begin{aligned} (a) \quad & -a_1 + \left(\frac{4A}{3} + A' \right) b_1 + a_3 - \frac{A'}{3} b_3 = \cos \varphi, \\ (b) \quad & (4A + A')a_1 + b_1 - 3b_3 - A'a_3 = \sin \varphi, \\ (c) \quad & a_1 - A'b_1 - 6a_3 + (4A + 2A')b_3 + 5a_5 - A'b_5 = -\cos \varphi, \\ (d) \quad & -b_1 - A'a_1 + 6b_3 + (4A + 2A')a_3 - 5b_5 - A'a_5 = -\sin \varphi, \\ (e) \quad & 3a_3 - A'b_3 - 10a_5 + (4A + 2A')b_5 + 7a_7 - A'b_7 = 0, \\ (f) \quad & 3b_3 - A'a_3 + 10b_5 + (4A + 2A')a_5 - 7b_7 - A'a_7 = 0, \\ (g) \quad & 5a_5 - A'b_5 - 14a_7 + (4A + 2A')b_7 + 9a_9 - A'b_9 = 0, \\ (h) \quad & -A'a_5 - 5b_5 + (4A + 2A')a_7 + 14b_7 - A'a_9 - 9b_9 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Величина φ в зависимости от A и A' определяется выражением

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R + R_{\delta}} = \arctg \frac{\omega L}{2R_o + R_{\delta}} = \arctg \frac{1}{2A + A'}. \quad (9)$$

Если величины $U_{\delta}, I_{\delta}, R_{\delta}$ известны, то система (8) может быть решена с заданной степенью точности при различных значениях L . Для большинства существующих схем "разрядная лампа – индуктивный ПРА" имеет место условие $A' \ll A$. Например, для ЛЛ мощностью 40 Вт значение R_{δ} составляет примерно 20 Ом, так что при

$$R_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{110}{0,43} = 128 \text{ Ом} \text{ имеем } A' \approx 0,155 \text{ А. При этом решение сис-}$$

темы (8) мало отличается от полученного в работе [1] для случая $A' = 0$ (идеальный индуктивный балласт без потерь). Значение L при указанном отношении A'/A , обеспечивающее заданные значения U_{δ} и I_{δ} , составляет $L = 1,265$ Гн, что всего на 1% отличается от найденного в работе [1] ($L = 1,275$ Гн). Заметим, что при фиксированных значениях U_{δ}, I_{δ} и L значение φ должно быть меньшим при $A' \neq 0$ по сравнению со случаем $A' = 0$, что видно из формулы (9). В то же время традиционные расчетные методики [4] дают противоположный результат. Например, при указанных выше значениях параметров для люминесцентных ламп мощностью 40 Вт существующая методика дает значение $\varphi = 65^{\circ}50'$ вместо $57^{\circ}20'$ при $A' = 0$. Это свидетельствует о несовершенстве названной методики, базирующейся в основном на эмпирическом подходе.

Форма тока в цепи "разрядная лампа – индуктивный ПРА" при $A' \ll A$, естественно, мало отличается от имеющей место для случая $A' = 0$. Если, однако, значение A' становится сравнимым с A , то форма тока в рассматриваемой цепи заметно изменяется и может стать неблагоприятной со светотехнической точки зрения из-за появления токовых пауз в начале и конце полупериода разряда. В качестве иллюстрации рассмотрим случай $A = 0,45$, $A' = 0,20$, т.е. $A'/A = 0,44$. При

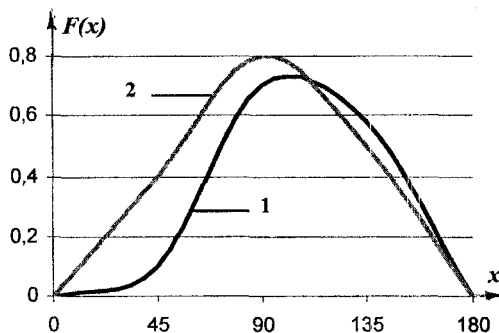
$$\text{этом } \varphi = \arctg \frac{1}{2 \cdot 0,45 + 0,20} = 42^{\circ}20', \sin \varphi = 0,67, \cos \varphi = 0,74.$$

Тогда приближенное решение системы уравнений (8) (с точностью до 0,01) дает следующие значения коэффициентов Фурье: $a_1 = -0,21$;

$a_3=0,010$; $a_5=0,06$; $a_7=0,05$; $b_1=0,59$; $b_3=-0,165$; $b_5=-0,06$; $b_7=-0,01$.

Соответствующая форма тока представлена кривой 1 на рисунке; здесь же для сравнения показана расчетная форма тока при $A'/A=0$ — кривая 2. Видно, что при указанном отношении A'/A в форме тока появляется токовая пауза; кроме того, снижается максимальное значение $f(x)$ при $\omega t = \pi/2$. Таким образом, данное значение A'/A является нерациональным. Дополнительное исследование показывает, что благоприятная форма тока в рассматриваемой цепи получается при $A'/A \lesssim 0,2$.

Следует отметить, что данная методика расчета параметров цепи, содержащей разрядную лампу и индуктивный балласт, обладает еще одним преимуществом по сравнению с традиционной. Оно заключается в том, что эта методика позволяет довольно просто определить расчетным



Форма тока в цепи "РЛ — индуктивный балласт";

1 — $A'/A=0,44$; 2 — $A'/A=0$

путем относительное содержание высших гармоник тока. Отношения амплитуд соответствующих гармоник определяются формулами

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}, \quad \frac{A_5}{A_1} = \frac{\sqrt{a_5^2 + b_5^2}}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}, \dots \quad (10)$$

В соответствии с требованиями стандарта [3] эти отношения должны составлять

$$\frac{A_3}{A_1} \leq 25 \frac{\cos \varphi}{0,9} (\%), \quad \frac{A_5}{A_1} \leq 7 \, \%.$$

При $A'/A=0$ по данным работы [1] находим: $\frac{A_3}{A_1} \approx 0,13$;

$\frac{A_5}{A_1} \approx 0,06$, что при $\cos \varphi = 0,55$ соответствует указанным требованиям.

В случае $A' / A = 0,44$ по приведенным выше значениям коэффициентов Фурье находим

$$\frac{A_3}{A_1} \approx 0,31; \quad \frac{A_5}{A_1} \approx 0,13,$$

что явно выше требуемых стандартом значений. Нормированные значения содержания высших гармоник достигаются при $A' / A \leq 0,2$, как отмечалось выше.

Таким образом, предварительный расчет параметров работы комплекта "разрядная лампа – индуктивный ПРА" предлагаемым методом позволяет установить допустимое активное сопротивление балласта (характеристик обмотки дросселя), при котором обеспечивается достаточно приемлемая форма тока в той или иной схеме стабилизации режимов работы ламп индуктивным балластом.

1. Мвуджо Е.А. Исследование формы тока в схеме стабилизации комплекта "разрядная лампа – индуктивный балласт" с применением синус-квадратичной аппроксимации динамики проводимости плазмы разряда // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.38. – К.: Техніка, 2001. – С.225-230.

2. Намитоков К.К., Пахомов П.Л., Харин С.Н. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 208 с.

3. ГОСТ 16809-78. Аппараты пускорегулирующие для газоразрядных ламп. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 56 с.

4. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 525 с.

Получено 30.04.2002

УДК 621.3

А.А.ХАРИСОВ, канд. техн. наук

Харьковская государственная академия городского хозяйства

К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПРЯМЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ

Рассматривается вопрос распределения плотности постоянного электрического тока в поперечном сечении прямых цилиндрических проводников.

В существующей практике расчетов электрических и магнитных полей, создаваемых прямыми цилиндрическими проводниками по которым протекает постоянный электрический ток, обычно априорно полагается, что плотность тока в поперечном сечении проводников распределяется равномерно