

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Канд. техн. наук А. Е. КРАСНОПОЛЬСКИЙ
ВНИИстандартэлектро

An equation system is proposed describing the electric characteristics of fluorescent lamps. Calculational results for the electric parameters of the lamp when fed with a pulsed voltage and sinusoidal current are in good agreement with experiment.

* * *

Расчет сложных схем пускорегулирующих аппаратов (ПРА) и, в первую очередь, импульсных полупроводниковых ПРА не может проводиться традиционными методами с применением алгебраической аппроксимации формы напряжения на лампе. В полупроводниковых импульсных ПРА форма напряжения на лампе существенно зависит от электрического режима и заранее, как правило, неизвестна.

Для расчетов импульсных ПРА целесообразно использовать дифференциальную аппроксимацию электрических характеристик ламп, учитывающую инерционность газового разряда и его предысторию. Однако анализ литературы показал [Л. 1], что в настоящее время отсутствует дифференциальное уравнение, описывающее с удовлетворительной точностью динамические вольт-амперные характеристики люминесцентных ламп. В настоящей статье сделана попытка получить такое дифференциальное уравнение, пригодное для расчета широкого класса схем ПРА с люминесцентными лампами. При этом для облегчения использования уравнения для расчетов схем ПРА, все входящие в уравнение коэффициенты приняты постоянными, что спрашивчиво, конечно, лишь в первом приближении.

В качестве определяющего параметра при выводе аппроксимирующего уравнения принята средняя концентрация электронов n_e и принято 3 постулата, несколько отличающиеся от постулатов Френсиса [Л. 2].

1. Скорость ионизации атомов ртути пропорциональна градиенту потенциала (при постоянных размерах лампы модулю напряжения на столбе разряда или приближенно на лампе $|u_{\text{л}}|$) и концентрации электронов n_e .

2. Скорость деионизации пропорциональна средней концентрации электронов n_e .

3. Электропроводность лампы пропорциональна концентрации электронов n_e и подвижности электронов b_e :

$$b_e = \frac{b_0}{1 + K_1 (|u_{\text{л}}| / U_0 - 1)}, \quad (1)$$

где U_0 — установившееся напряжение горения разряда на постоянном токе; b_0 — подвижность электронов при $|u_{\text{л}}| = U_0$; K_1 — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции лампы $K_1 = 0,3 \div 0,5$.

Рассмотрим некоторые обоснования предложенных постулатов. Первый постулат соответствует теоретическим результатам, полученным в [Л. 3] для ртутных ламп низкого давления при двухступенной ионизации атомов ртути и постоянной концентрации метастабильных атомов. Аналогичные результаты получены в [Л. 4]

теоретически и подтверждены экспериментально. Знак модуля у напряжения на лампе $|u_{\text{л}}$ введен по той причине, что ионизация не зависит от направления

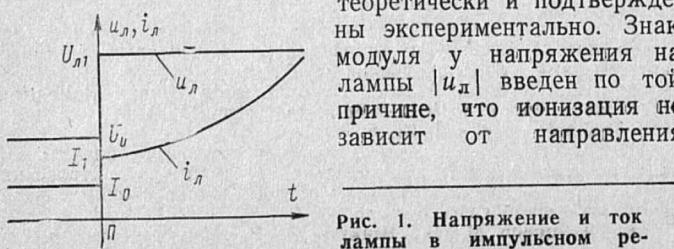


Рис. 1. Напряжение и ток лампы в импульсном режиме.

градиента электрического поля, а только от его величины.

Второй постулат совпадает со вторым постулатом Френсиса [Л. 1, 2] и справедлив при рекомбинации электронов на стенках ламп, что подробно рассмотрено в дискуссии [Л. 5].

Третий постулат является уточнением соответствующего постулата Френсиса с учетом результатов, полученных в [Л. 4, 6].

На основе первого и второго постулатов получаем уравнение баланса электронов:

$$dn_e/dt = A' n_e |u_{\text{л}}| - C' n_e. \quad (2)$$

На основе третьего постулата — уравнение электропроводности:

$$G_{\text{л}} = \frac{i_{\text{л}}}{u_{\text{л}}} = \frac{n_e b_0}{F[1 + K_1 (|u_{\text{л}}| / U_0 - 1)]}, \quad (3)$$

где $G_{\text{л}}$ и $i_{\text{л}}$ — электрическая проводимость и ток лампы соответственно; A' , C' , F — постоянные коэффициенты, зависящие от конструкции лампы.

Уравнения (2) и (3) описывают электрические характеристики люминесцентной лампы.

В установившемся режиме при $dn_e/dt = 0$, $u_{\text{л}} = \pm U_0 = \pm C'/A'$ и $G_{\text{л}} = (n_e b_0)/F$.

Уравнения (2) и (3) могут быть упрощены введением безразмерных величин. При этом в качестве базовых величин удобно выбрать номинальные параметры на постоянном токе (U_0 , I_0 , n_{e0}) и постоянную времени деионизации лампы $\tau_{\text{л}} = 1/C'$. В качестве безразмерных величин введем отношения:

$$\bar{t} = i_{\text{л}}/I_0; \bar{u} = u_{\text{л}}/U_0; \bar{n} = n_e/n_{e0}; \theta = t/\tau_{\text{л}}. \quad (4)$$

Подставляя безразмерные отношения (4) в уравнения (2) и (3), получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{n}}{d\theta} &= \bar{n} (|\bar{u}| - 1); \\ \bar{g} &= \frac{\bar{i}}{\bar{u}} = \frac{\bar{n}}{1 + K_1 |\bar{u}| - K_1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Система уравнений (5) допускает замкнутое решение при заданном напряжении на лампе \bar{u} . При произвольной форме напряжения \bar{u}

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \bar{n}_0 e^{\int_0^\theta (|\bar{u}| - 1) d\theta}; \\ \bar{i} &= \bar{i}_0 \frac{\bar{n} e^{\int_0^\theta (|\bar{u}| - 1) d\theta}}{1 + K_1 |\bar{u}| - K_1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{n}_0 = \bar{n}(0)$; $\bar{i}_0 = \bar{i}(0)$.

Из (6) легко могут быть получены условия стационарности режима. На постоянном токе $\bar{n} = \bar{n}_0$; $\bar{u} = \pm 1$ или $u_{\text{л}} = \pm U_0$. На переменном токе с периодом T : $\bar{n}(T) = \bar{n}_0$ и

$$\int_0^{T/\tau_{\text{л}}} (|\bar{u}| - 1) d\theta = 0. \quad (7)$$

Откуда следует, что $\bar{u}_{\text{ср}} = \pm 1$ или $U_{\text{л,ср}} = \pm U_0 = \text{const}$.

В нестационарных режимах при подаче на лампу постоянного напряжения $U_{л1} > U_0$ (рис. 1)

$$i_{л} = I_0 \frac{U_{л1}}{U_0} \cdot \frac{e^{(U_{л1}/U_0 - 1) \theta}}{1 + K_1 \frac{U_{л1}}{U_0} - K_1}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) находим, что начальная ступенька тока (см. рис. 1)

$$I_1/I_0' = \frac{U_{л1}}{U_0} \cdot \frac{1}{1 + K_1 (U_{л1}/U_0) - K_1} < \frac{U_{л1}}{U_0} \quad (9)$$

и логарифмическая производная тока лампы

$$\frac{d \ln i_{л}}{dt} = \frac{1}{i_{л}} \cdot \frac{di_{л}}{dt} = \frac{1}{\tau_{л}} \left(\frac{U_{л1}}{U_0} - 1 \right) = \text{const}, \quad (10)$$

что хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными в [Л. 4].

К сожалению, уравнения (5) не могут быть решены в квадратурах при заданной форме тока лампы. Такое решение может быть получено только приближенно. Нами на ЭВМ «Минск-32» получено решение системы уравнений (5) при питании лампы синусоидальным током $i_{л} = I_m \sin \omega t$. На рис. 2 приведены рассчитанные осциллограммы напряжения на лампе при различных значениях параметра $\omega t_{л}$. Как видно из рисунка 2 на низких частотах ($\omega t_{л} = 0,01$ и $0,1$) напряжение на лампе приближается к прямоугольному с выбросом в начале и в момент перезажигания. При повышении частоты ($\omega t_{л} = 10$) напряжение приближается к синусоидальному. Это хорошо совпадает с экспериментальными результатами, полученными в [Л. 7].

Таким образом, система уравнений (5) удовлетворительно описывает динамические характеристики люминесцентных ламп как в импульсном режиме, так и при синусоидальном токе в широком диапазоне частот, и может быть применена для расчетов электрических режимов люминесцентных ламп.

Для расчетов по уравнениям (5) необходимо знать 3 параметра: установившееся напряжение U_0 , постоянную времени деионизации $\tau_{л}$ и коэффициент K_1 .

Установившееся напряжение легко может быть измерено на постоянном или переменном токе.

Для определения коэффициента K_1 могут быть использованы электрические характеристики лампы при подаче ступенек напряжения. Тогда из уравнения (9)

$$K_1 = \frac{U_{л1}/U_0 - I_1/I_0}{I_1/I_0 (U_{л1}/U_0 - 1)}. \quad (11)$$

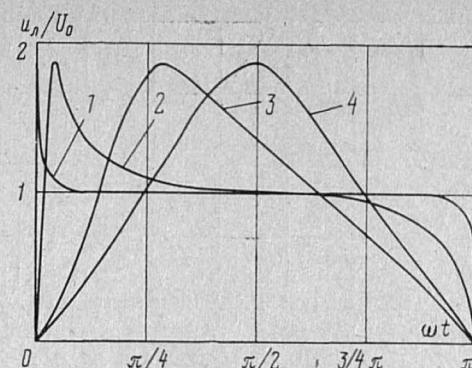


Рис. 2. Расчетные осциллограммы напряжения на лампе при питании синусоидальным током при $K_1=0,35$. Параметр $\omega t_{л}$ равен: 1 – 0,01; 2 – 0,1; 3 – 1; 4 – 10.

В [Л. 4] по такой методике найдено, что $K_1=0,3 \div 0,5$ для люминесцентных ламп в трубке диаметром 38 мм. Нами коэффициент K_1 определялся при подаче ступенек тока $i_{л}$ и получены близкие результаты. Из импульсных характеристик лампы также может быть определена постоянная времени деионизации $\tau_{л}$, которая в соответствии с (10) зависит от логарифмической производной тока лампы $i_{л}$. Проведенные измерения показали, что величина постоянной времени деионизации для люминесцентных ламп в трубке диаметром 38 мм лежит в пределах $\tau_{л}=120 \div 300$ мкс, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [Л. 4]. Коэффициенты K_1 и $\tau_{л}$ существенно зависят от окружающей температуры и давления аргона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснопольский А. Е. О дифференциальном уравнении газоразрядной лампы. — Светотехника, 1977, № 12, с. 13.
2. Francis V. J. Fundamentals of Discharge Tube Circuits. New York, 1948, p. 31–55.
3. Каган Ю. М., Лягущенко Р. И., Миленин В. М. и др. О модулированном режиме положительного столба разряда. — ЖТФ, 1975, т. 45, вып. 5, с. 1019–1025.
4. Waymouth J. E. Current Runaway in Fluorescent Lamps. — Illum. Eng. Sos., 1972, vol. 2, № 1, p. 43–49.
5. Peek S. C., Spencer D. E. A Differential Equation For the Fluorescent Lamp. — Illum. Eng. Sos., 1968, vol. 63, № 4, p. 157–166.
6. Гравовский В. Л. Электрический ток в газах. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1952, с. 285.
7. Литвинов В. С., Троицкий А. М., Холопов Г. К. Характеристики отечественных люминесцентных ламп при работе на повышенных частотах. — Светотехника, 1961, № 1, с. 6–8.

УДК 621.327.52

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУГЕ И КАТОДНОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ШАРОВЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМПАХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Канд. техн. наук Г. И. РАБИНОВИЧ

Всесоюзный светотехнический институт

The paper gives a simplified formula for voltage calculations with spherical xenon lamps. Based on the power balance equation analysis for the working cathode end and dependence of the lamp life on its current, a value of the cathode potential drop equal to about 5 V was obtained.

* * *

Напряжение на газоразрядной лампе является одной из основных ее характеристик. Необходимо уточнить известную формулу

$$U = U_{ст} + U_a + U_k, \quad (1)$$

где $U_{ст}$ — напряжение на столбе дуги, В, определяется по [Л. 1, 2]; U_a , U_k — анодное и катодное падения

напряжения, В, которые в [Л. 3] приняты равными 1 и 9 В соответственно согласно измерениям [Л. 4] для катода из чистого вольфрама при токе около 10 А и неконтролированной плотности тока. Однако в этом режиме катод был явно переохлажден, с ростом температуры (или ростом тока) и уменьшением работы выхода катода катодное падение должно резко падать, кроме того, в (1) не учтена разность работ выхода анода и катода $\delta\Phi$, В, достигающая в реальных лампах (анод — из чистого вольфрама, катод — из торированного вольфрама) 2 В [Л. 5].

Напряжение на лампе [Л. 6] равно:

$$U = U_{ст} + U_a + U_k + \delta\Phi. \quad (2)$$