

О ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

В. П. ЗИБАЛОВ, М. С. РОЙТМАН

Маломощные лампы накаливания (ЛН) с вольфрамовой нитью нашли применение в различных областях измерительной техники, в устройствах автоматического управления и регулирования, в амплитудно-стабильных автогенераторах. Очень часто технические показатели соответствующих устройств существенно зависят от характеристик переходных процессов, протекающих в лампах накаливания. Однако динамика этих процессов изучена в настоящее время недостаточно полно. В работах [1, 2] приводятся некоторые переходные характеристики вольфрамовых нитей, нагреваемых электрическим током, но без учета передачи тепла нитью, токоподводам. Попытки учета последнего обстоятельства делаются в ряде работ [3, 4, 7]. В этих работах электрические и тепловые процессы, протекающие в ЛН, для относительно малых изменений температуры представляются линеаризованным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\tau_1 \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = \kappa_1 \Delta P_{\text{э}}, \quad (1)$$

где τ_1 и κ_1 — параметры ЛН, зависящие от ее конструктивных и технологических данных, обычно определяемые расчетным или экспериментальным путем в выбранной рабочей точке;

ΔT — изменение «усредненной по длине» [5] температуры нити;

$\Delta P_{\text{э}}$ — изменение подводимой к ЛН электрической мощности.

При этом потери мощности из-за отвода тепла токоподводами и держателями учитывались введением поправок на длину реальной нити.

Такая идеализация процесса передачи тепла нитью правомерна только при рассмотрении стационарных режимов в ЛН [5] и является очень грубой для характеристики нестационарных режимов. Если учитывать в динамике передачу тепла от более нагретых частей нити к менее нагретым, благодаря теплопроводности, то нам необходимо для самого простейшего случая записать одномерное уравнение следующего вида [6]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{S} F(x, t), \quad (2)$$

где c — удельная теплоемкость тела накала (нити);

ρ — его плотность;

κ — коэффициент теплопроводности;
 S — площадь поперечного сечения нити;
 $F(x, t)$ — функция, выражающая наличие внутренних тепловых источников;

x — текущая координата, вдоль продольной оси нити. Мы предполагаем, что нить маломощных ЛН прямая, однородная и настолько тонкая, что в каждый момент времени, температура T всех точек данного поперечного сечения нити будет одной и той же. В противном случае нам пришлось бы записать уравнение теплопроводности для трехмерного пространства. Из уравнения (2) видно, что температура T является функцией координаты x и времени t . Если зафиксировать координату x , то функция $T(x, t)$ выражает закон изменения температуры в данном сечении нити с течением времени.

Как известно, между энергией теплового движения какого-либо тела и температурой существует простая зависимость:

$$Q = c_p VT, \quad (3)$$

где Q — энергия теплового движения или, что то же самое, кол-во тепла в калориях;

T — абсолютная температура;

V — объем тела.

Используя (3), можно установить сколько тепла передается в данном сечении нити, т. е. для фиксированного x . Если же просуммировать тепло по всей длине нити при постоянном t , то найдем закон передачи тепла (энергии, мощности) в функции времени. Таков в общем виде путь решения поставленной задачи, но на этом пути есть непреодолимые, на наш взгляд, трудности. Чтобы получить функцию $T(x, t)$, нам необходимо интегрировать уравнение (2) при определенных начальных и граничных условиях.

Граничные условия, т. е. закон охлаждения концов нити держателями неизвестен, этот вопрос для маломощных ЛН никем не исследовался. Поэтому нет возможности получить зависимость $T = T(x, t)$ в аналитическом виде, следовательно мы не можем выразить мощность, передаваемую держателям во времени.

Но из (4) видно, что дифференциальное уравнение теплопроводности — уравнение первого порядка по переменной t , очевидно, закон передачи тепла во времени должен подчиняться экспоненциальной зависимости. Основываясь на такой гипотезе, мы примем в качестве математической модели процесса передачи тепла (мощности) от нити к держателям уравнение вида:

$$\tau_2 \frac{d(\Delta P_d)}{dt} + \Delta P_d = \kappa_2 \Delta T, \quad (4)$$

где τ_2 и κ_2 — параметры ЛН, зависящие от ее конструктивных и технологических данных, определяемые экспериментальным путем;

ΔP_d — изменение мощности, отводимой держателями.

В указанных ранее работах не учитывался процесс обратного излучения энергии стенками колбы ЛН на поверхность нити. Не анализируя сложной картины поглощения и лучеиспускания колбой тепловой мощности, мы запишем по аналогии с (4) следующее уравнение:

$$\tau_3 \frac{d(\Delta P_k)}{dt} + \Delta P_k = \kappa_3 \Delta T, \quad (5)$$

где τ_3 и κ_3 — параметры ЛН, определяемые экспериментально;

ΔP_k — изменение мощности, излучаемой колбой.

В целом для ЛН записываем уравнение теплового баланса:

$$\Delta P_T + \Delta P_d + \Delta P_r = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_K, \quad (6)$$

где ΔP_T — мощность, теряемая на изменение теплосодержания нити и излучение;

ΔP_d — мощность, отводимая от нити путем охлаждения ее держателями и токоподводами;

ΔP_r — мощность, передаваемая через газовую среду (для вакуумных ЛН ею обычно пренебрегают [5]);

$\Delta P_{\text{э}}$ — мощность, выделяемая электрическим током;

ΔP_K — мощность излучения, поглощаемая нитью со стороны стенок колбы.

Мощность ΔP_K подведена как бы извне для нити, поэтому она записана в правую часть уравнения (6). Это хорошо отвечает реальному физическому процессу, если по какой-либо причине изменится температура колбы, то естественно изменится температура нити, благодаря лучеиспусканию энергии со стенок колбы.

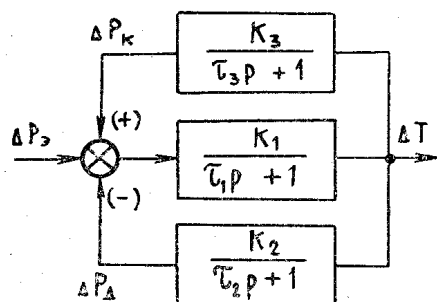


Рис. 1. Структурная схема передачи воздействий в ЛН.

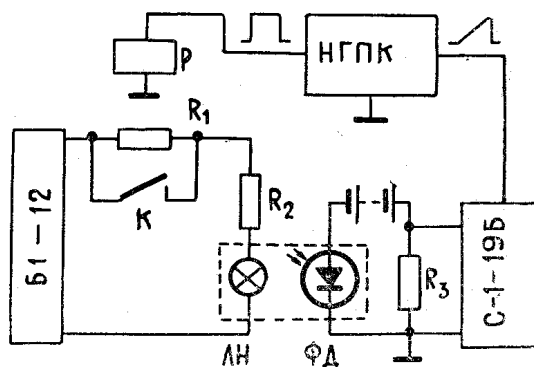


Рис. 2.

Таким образом, переходные процессы, происходящие в ЛН, описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T &= \kappa_1 (\Delta P_{\text{э}} + \Delta P_K - \Delta P_d) \\ \tau_2 \frac{d(\Delta P_d)}{dt} + \Delta P_d &= \kappa_2 \Delta T \\ \tau_3 \frac{d(\Delta P_K)}{dt} + \Delta P_K &= \kappa_3 \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если в качестве входной величины, вызывающей переходный процесс, мы примем изменение подводимой электрической мощности $\Delta P_{\text{э}}$, а за выходную — изменение «интегральной» температуры нити ΔT , то можем составить структурную схему передачи воздействий в ЛН (рис. 1).

Схема составлена так, что она отражает физику явлений: изменение подводимой электрической мощности от установившегося значения вызывает изменение температуры нити. Это приводит к соответствующему изменению потребляемой ЛН мощности через цепи обратных связей. Нижняя ветвь (рис. 1) обратной связи отражает потребление мощности держателями, верхняя ветвь — приток мощности за счет обратного излучения колбой.

На основании структурной схемы может быть получена передаточная функция ЛН:

$$\frac{\Delta T(p)}{\Delta P_{\text{э}}(p)} = \frac{\frac{\kappa_1}{\tau_1 p + 1}}{1 + \frac{\kappa_1}{\tau_1 p + 1} \left(\frac{\kappa_2}{\tau_2 p + 1} - \frac{\kappa_3}{\tau_3 p + 1} \right)}, \quad (8)$$

где

$$p \equiv \frac{d}{dt}.$$

Естественно возникает вопрос: как хорошо передаточная функция (8) отражает поведение ЛН? Ответ на этот вопрос может дать только эксперимент. Изучение переходных процессов в линейном приближении проводилось на ЛН типа НСМ 6×20 обычной и софитной конструкции. Лампы накаливания предварительно подвергались старению током 20 ма в течение 48 часов. На рис. 2 представлена схема измерительной аппаратуры, использованной для проведения необходимых исследований. Скачкообразные (малые) изменения подводимой мощности

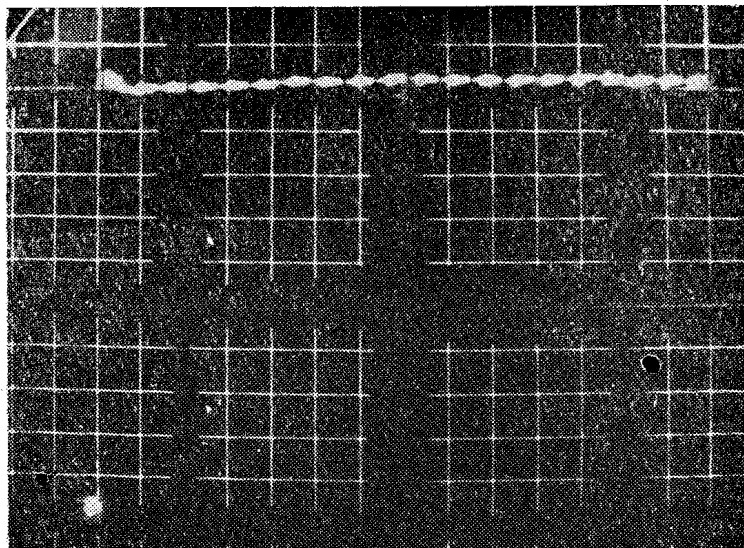
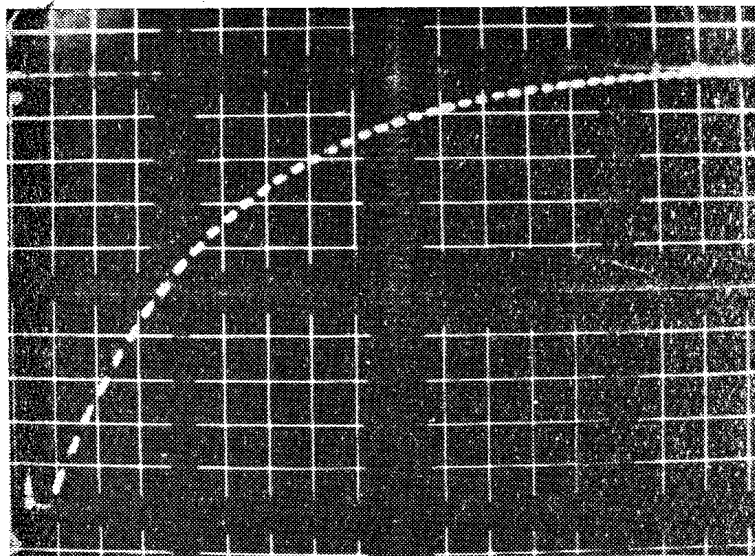


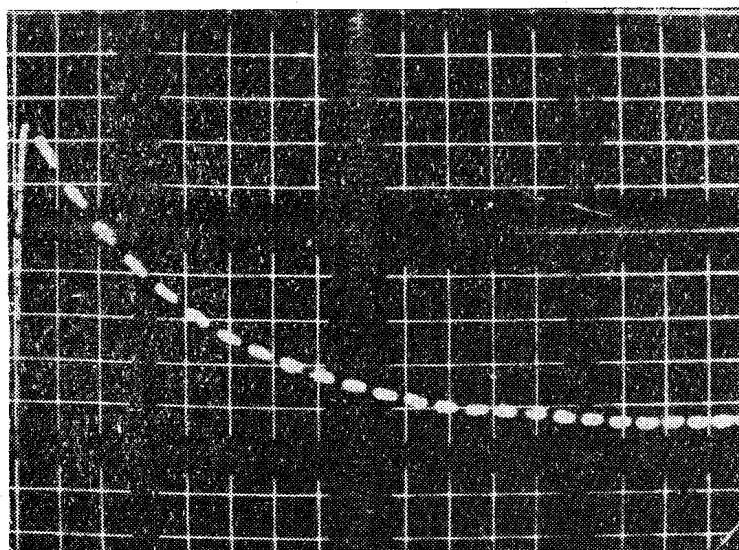
Рис. 3.

к ЛН задаются замыканием резистора R_1 контактом К реле Р, управляемом от генератора НГПК. От этого же генератора подается медленная развертка на осциллограф С1-19Б. Контроль за изменением температуры ЛН осуществляется с помощью фотодиода (ФД) типа КФДМ, который практически без запаздывания реагирует на приращение светового потока ЛН, а соответственно и на изменение температуры нити. Под действием света ФД меняет свое сопротивление (в схеме используется его обратное включение) и, следовательно, на осциллограф подается с резистора R_3 сигнал, пропорциональный изменению температуры нити ЛН в некотором масштабе.

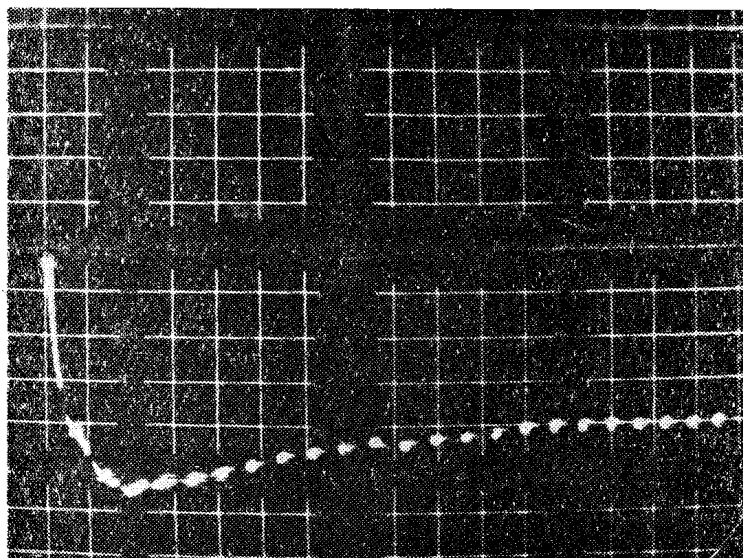
Экспериментальная переходная характеристика, приведенная на рис. 3, дает общее представление об изменении температуры нити, из которой видно, что в начальный момент температура относительно быстро изменяется до некоторого максимального значения (на рис. 3 — скачок из-за медленной развертки, назовем его 1-й этап), затем темпе-



a



б



в

Рис. 4 а, б, в. Переходные характеристики ЛН

ратура падает до определенной величины (II-й этап) и в дальнейшем она медленно стремится к новому установившемуся значению (III-й этап). На рис. 4 а сфотографирован I-й этап с быстрой разверткой, цена каждой метки 10 мсек. Второй и третий этапы соответственно представлены в уменьшенном масштабе по вертикальной оси на рис. 4 б и 4 в. Цена меток для рис. 4 б — 1 сек и для рис. 4 в — 10 сек.

Полученные характеристики использовались для определения коэффициентов передаточной функции ЛН методом интерполяции [8]. В первом приближении постоянные времени τ_1 , τ_2 и τ_3 можно найти по формуле:

$$\tau = t_1 \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2 - \Delta T_1},$$

где ΔT_1 — отклонение выходной величины ЛН в произвольно выбранный момент времени t_1 ;

ΔT_2 — отклонение выходной величины в момент времени $t_2 = 2t_1$.

Такая возможность представляется в силу того, что для каждой из кривых (рис. 4 а, б и в) хорошо выполняется свойство экспоненты [9].

Величины ΔT_1 , ΔT_2 и t_1 необходимо брать из осциллограммы соответствующего этапа.

Для ЛН, переходные характеристики которой приведены в статье, коэффициенты передаточной функции имеют следующие значения:

$$\kappa_1 = 59 \frac{^{\circ}K}{мвт}; \quad \kappa_2 = 0,00063 \frac{мвт}{^{\circ}K}; \quad \kappa_3 = 0,00013 \frac{мвт}{^{\circ}K};$$

$$\tau_1 = 0,1 \text{ сек}; \quad \tau_2 = 1,8 \text{ сек}; \quad \tau_3 = 67 \text{ сек}.$$

На основании этих данных были сделаны расчеты переходных процессов в ЛН по этапам. Расчетные характеристики отличаются от экспериментальных не более чем на 2%. Приведенные эксперименты и расчеты достаточно хорошо подтвердили принятую в статье математическую модель переходных процессов в лампах накаливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. C. Gupta and M. Satyam. Some transient characteristics of electrically heated tungsten filaments I. Sci. Instrum, № 5, vol, 4, 1963.
2. Л а к ш м и н а р я н. С а т и я п. Некоторые переходные характеристики вольфрамовых нитей накала, нагреваемых электрическим током. Труды ИИЭР, № 9, 1965.
3. Э. И. Ц и м б а л и с т. Применение фотоэлектрических преобразователей в источниках калиброванного переменного напряжения. Диссертация, Томск, 1966.
4. В. Ф. А н и к и н. Разработка и исследование стабилизирующих устройств переменного напряжения с фотоэлектрическими преобразователями. Диссертация. Томск, 1969.
5. А. П. И в а н о в. Электрические источники света. Госэнергоиздат, 1955.
6. Г. Ф. М у ч н и к, И. Б. Р у б а ш о в. Методы теории теплообмена. Ч. I. Теплопроводность. Изд-во «Вышая школа», 1970.
7. А. С. С и н и ц к и й. Некоторые вопросы расчета и применения нелинейных цепей в измерительной технике. Диссертация, Львов, 1954.
8. И. А. О р у р к. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем, Изд-во «Наука», 1965.
9. О. Б. В л а с о в-В л а с ю к. Экспериментальные методы в автоматике. Изд-во «Машиностроение», 1969.