

## ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ЛАМПОЧКА НАКАЛИВАНИЯ КАК УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

М. С. РОЙТМАН, Б. А. ПЕРМИНОВ, Э. И. ЦИМБАЛИСТ, Н. П. ФЕФЕЛОВ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Сложность решения различных вопросов по измерению, стабилизации или регулированию напряжений, токов, частоты, фазы и др. параметров в значительной степени, а зачастую и в основном, определяется характеристиками управляемого элемента. Современная техника располагает весьма обширным арсеналом электрически управляемых элементов (электро-вакуумных, полупроводниковых, магнитных, диэлектрических). Однако немногие из них могут быть непосредственно включены в цепь переменного тока и не менять при этом спектр напряжения. Другими словами, количество элементов, линейных по управляемой цепи, невелико. Но перечень элементов еще более сужается, когда наряду с требованиями линейности предъявляется и требование независимости сопротивления от мгновенных значений управляющего фактора, а также линейности по управляющей цепи. Практически этим требованиям при известных ограничениях удовлетворяют лишь термисторы и металлические термосопротивления с косвенным подогревом, а также лампочки накаливания в сочетании с фотосопротивлениями.

Свойства цепей с термисторами довольно полно изложены в литературе, в частности, в [1]; там же приведены данные по термисторам отечественного производства. Однако термисторы с косвенным подогревом, наряду с известными положительными свойствами, обладают и рядом недостатков, основными из которых являются значительная зависимость от температуры окружающей среды и большая инерционность (у ТКП-300 постоянная времени равна 13,5 сек., у ТКП-20 — 143 сек.). Металлическим термосопротивлениям с косвенным подогревом [2] указанные недостатки свойственны в значительно меньшей степени, но у них мал относительный коэффициент передачи и, главное, они не выпускаются промышленностью.

За последние годы, в связи с появлением лампочек накаливания с номинальными токами, имеющими порядок десятков ма и напряжениями порядка единиц вольт, а также достаточно стабильных во времени и от температуры фотосопротивлений с большой кратностью изменений проводимости от освещения, появилась возможность создания весьма чувствительных электрически управляемых элементов. О некоторых возможных применениях подобных элементов сообщалось в [3, 4] и др.; однако, насколько известно авторам, достаточно полных характеристик таких элементов нет, что не позволяет четко судить о применимости их для решения той или иной конкретной технической задачи, а также о тех принципиальных возможностях, которые они могут обеспечить.

Авторами настоящей работы были проведены исследования характеристик управляемых элементов на базе лампочек накаливания (МИН-1, МИН-3, «Тесла») и низкоомных фотосопротивлений (ФС) на основе сернистого кадмия — СФ2-2 и ФСК-2Н. Ниже излагаются результаты этих исследований.

**Коэффициент передачи.** Под относительным коэффициентом передачи управляемого элемента будем понимать отношение относительного изменения выходного параметра (в нашем случае сопротивления  $FS-R_\phi$ ) к относительному изменению входного параметра. В зависимости от режима работы входным параметром является либо ток  $I_\lambda$ , либо напряжение  $U_\lambda$  на лампочке. Таким образом, будем различать относительный коэффициент передачи по току  $K_i$  и по напряжению  $K_u$ :

$$K_i = \frac{\frac{\Delta R_\phi}{R_\phi}}{\frac{\Delta I_\lambda}{I_\lambda}}, \quad K_u = \frac{\frac{\Delta R_\phi}{R_\phi}}{\frac{\Delta U_\lambda}{U_\lambda}}$$

На рис. 1 приведены усредненные зависимости  $R_\phi = f(I_\lambda)$  для 4 образцов СФ2-2 и 8 образцов ФСК-2Н до и после старения. Как

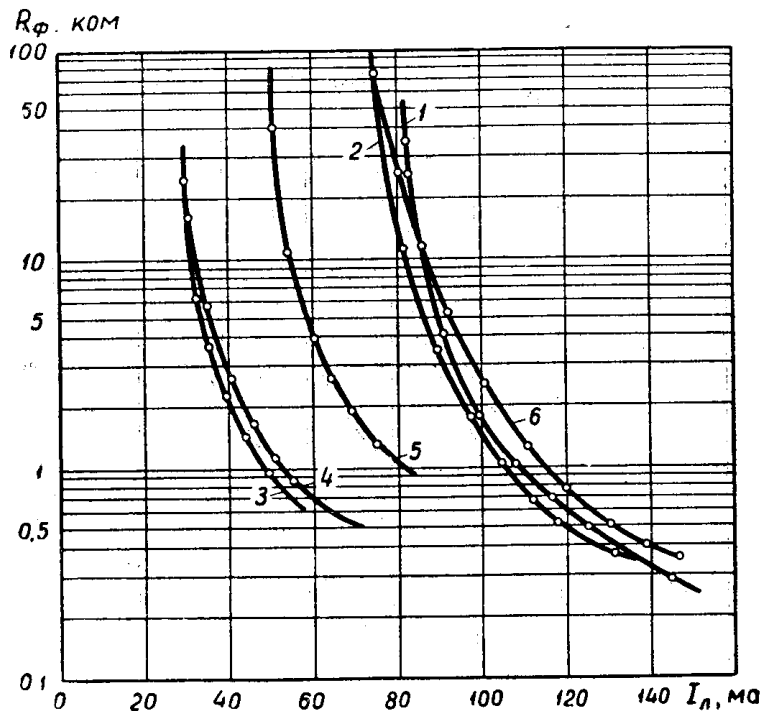


Рис. 1. 1—ФС-К2Н и МИН-3 до старения; 2—то же после 1400 часов старения, 3—СФ2-2 и лампочка «Тесла» до старения, 5—тоже после 400 часов старения. 6—СФ2-2 и МИН-3 до старения, 4—СФ2-2 и МИН-1 до старения.

видно из рисунка, величина сопротивления освещенного  $FS-R_{осв.}$  в паре с лампочками «Тесла» (6в., 0,05а) и МИН-1 (1в., 0,075а) составляет примерно 1 ком; в паре с лампочкой МИН-3 (2,5в., 0,16а) сопротивление уменьшается до 200—300 ом. Темновое сопротивление  $FS-R_m$  обычно имеет порядок  $10^8 \div 10^9$  ом. Таким образом, крат-

ность изменения сопротивлений  $\gamma = \frac{R_m}{R_{\text{осв.}}}$  имеет величину  $10^6$  и выше и значительно превышает паспортные данные на фотосопротивления.

В ряде случаев, при анализе схем с управляемым элементом необходимо знать аналитическое выражение функции  $R_\phi = f(I_\lambda)$ , либо  $R_\phi = f(U_\lambda)$ . При аппроксимации характеристик можно воспользоваться функциями:

$$R_\phi = R_\infty \cdot e^{\frac{a}{U_\lambda}}, \quad R_\phi = \frac{b}{U_\lambda + c} \text{ и др.}$$

Здесь  $U_\lambda$  — напряжение на лампочке накаливания,  
 $R_\infty$  — величина сопротивления ФС при  $U_\lambda = \infty$ ,  
 $a, b, c$  — постоянные.

Например, для фотосопротивления СФ2-2 и лампочки „Тесла“ зависимость сопротивления от напряжения на лампочке в пределах от 2,5 до 6 в. (30 ÷ 50 ма) до старения хорошо передается следующей

функцией (с погрешностью  $\pm 10\%$ ):  $R_\phi = 180 e^{\frac{10,8}{U_\lambda}}$ . Отсюда нетрудно получить выражение для относительного коэффициента передачи по напряжению

$$K_u = - \frac{10,8}{U_\lambda}. \quad (1)$$

Для МИН-3 и ФСК-2Н после 1400 час старения зависимость  $R_\phi = f(U_\lambda)$

в пределах  $U_\lambda = 0,8 \div 1,6$  в. аппроксимируется выражением  $R_\phi = 420 e^{\frac{4,5}{U_\lambda}}$  (с погрешностью  $\pm 10\%$ ). При этом:

$$K_u = - \frac{4,5}{U_\lambda}. \quad (2)$$

Знак минус в обоих случаях указывает на уменьшение сопротивления ФС при увеличении напряжения на лампочке. Относительный коэффициент передачи по току может быть выражен через  $K_u$  следующим образом:  $K_i = n_i \cdot K_u$ , где  $n_i$  — коэффициент, определяемый по усредненным вольтамперным характеристикам лампочек (рис. 2). Согласно рис. 2 для лампочек „Тесла“ (кривая 1)

$$I_\lambda = 6,15 (2,4 + U_\lambda),$$

для лампочек МИН-3 (кривая 2)

$$I_\lambda = 38 (1,35 + U_\lambda).$$

Выражая напряжение через ток, получим:

$$(K_i)_{\text{Тесла}} = - \frac{66,5 \cdot I_\lambda}{(I_\lambda - 14,5)^2}, \quad (3)$$

$$(K_i)_{\text{МИН-3}} = - \frac{171 \cdot I_\lambda}{(I_\lambda - 51,3)^2}. \quad (4)$$

Здесь  $I_\lambda$  — ток лампочки в ма.

Зависимость  $|K_u| = F(I_\lambda)$  и  $|K_i| = \Phi(I_\lambda)$ , построенные по формулам (1 ÷ 4), приведены на рис. 3.

Из рассмотрения рис. 3 можно заключить следующее:

1. В режиме заданного тока коэффициент передачи  $K_i$  больше, чем в режиме заданного напряжения  $K_u$ . Это связано с эффектом баррети-

рования у лампочек накаливания. Последнее наглядно иллюстрируется вольт-амперными характеристиками лампочек. Например, для лампочки «Тесла» изменению тока  $I_n$  от 30 ма до 35 ма, т. е. приблизительно на 17% соответствует изменение  $\frac{\Delta U_n}{U_n} = 33\%$ .

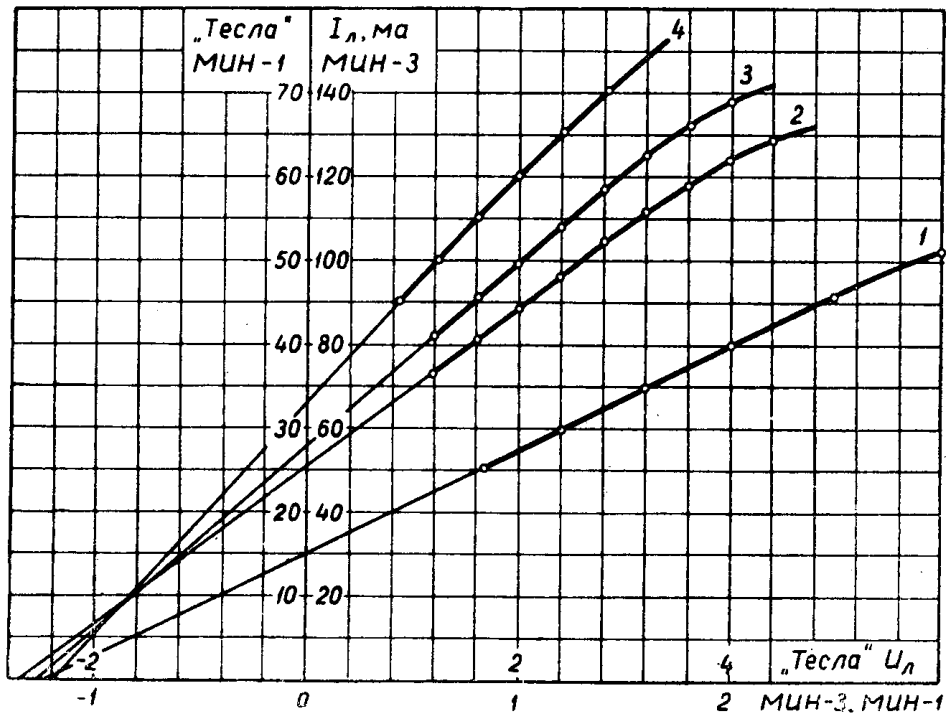


Рис. 2. 1 — «Тесла»; 2 — МИН-3 после старения, 3 — МИН-3 до старения, 4 — МИН-1.

2. Максимальный коэффициент передачи (около 10) имеет место при малых токах; по мере увеличения управляющего тока (напряже-

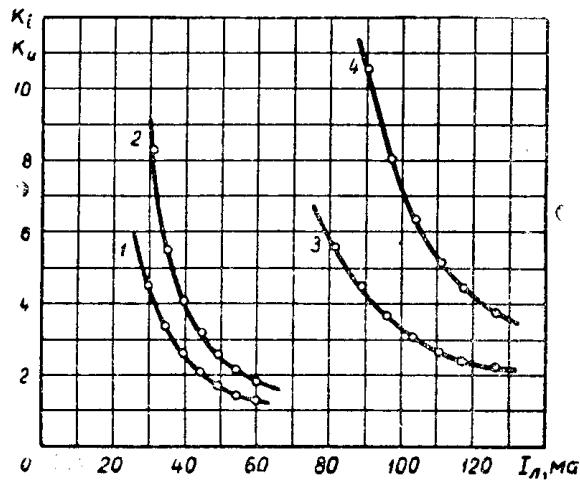


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи по току и напряжению от тока лампочек: 1, 2 — «Тесла» 3, 4 — МИН-3.

ния) коэффициент передачи падает, стремясь к определенной величине.

**Нелинейность.** Линейность по управляющей цепи определяется линейностью цепи лампочки накаливания. Как известно, лампочка накаливания является инерционным нелинейным элементом. Ее сопротивление линейно для переменных напряжений с частотой выше некоторой граничной  $f_{гр}$  и нелинейно для более низких частот. Значение граничной частоты определяется постоянными времени лампочки, а также допустимой для конкретного случая величиной нелинейных искажений.

Линейность элемента по управляемой цепи определяется вольт-амперной характеристикой фотосопротивлений. Линейность последней соблюдается до значительных электрических полей, после чего она нарушается вследствие инжекции электронов из контактов: при этом концентрация носителей тока перестает быть постоянной величиной и начинает возрастать с нарастанием электрического поля. Однако в области малых напряжений (порядка десятков мВ) фотосопротивления обладают заметной нелинейностью, которая в основном обусловлена неомичностью контактов и, следовательно, их асимметрией.

**Динамические характеристики.** В общем случае рассматриваемый управляемый элемент является нелинейным апериодическим звеном второго порядка. Коэффициент передачи его может быть выражен в следующем виде:

$$K(p) = \frac{R(I_n)}{(1 + p\tau_n) \cdot (1 + p\tau_\phi)},$$

где  $R(I_n)$  — соответствует рабочей точке на характеристиках, изображенных на рис. 1,

$\tau_n$  — постоянная времени лампочки накаливания;

$\tau_n = \tau_n$  при нарастании тока и  $\tau_n = \tau_{сп.}$  при спадании тока,

$\tau_\phi$  — постоянная времени фотосопротивления.

Переходный процесс в лампочке накаливания определяется условиями теплового баланса и в общем случае зависит от начальных значений и величин изменений мощности, потребляемой лампочкой. Следует отметить, что характер переходного процесса зависит от режима включения лампочек. Экспериментально исследовался характер переходных процессов светового потока лампочек накаливания МИН-3, МИН-1 и «Тесла». Источником напряжения прямоугольной формы являлся генератор НГПК, измерителем светового потока служил фотомножитель ФЭУ-1. Эксперименты показали, что переходные характеристики имеют типично нелинейный характер. При начальном напряжении, меньшем напряжения зажигания лампочки, на переходных характеристиках имеется задержка (рис. 4), обусловленная отсутствием светового потока в течение некоторого времени. С увеличением величины скачка напряжения время задержки и время нарастания светового потока уменьшаются. Постоянные времени нарастания светового потока  $\tau_n$  меньше постоянных времени спадания  $\tau_{сп.}$  для всех указанных выше лампочек.  $\tau_n$  и  $\tau_{сп.}$  различных лампочек лежат в пределах от десятков мсек до 0,2 ÷ 0,3 сек. Постоянная времени как по нарастанию, так и по спаданию фототока для СФ2-2 не превышает 0,06 сек, для ФСК-2Н — 0,1 сек. Об инерционности управляемого элемента можно судить по виду амплитудно-фазовых характеристик (АФХ). АФХ для СФ2-2 и лампочки МИН-3 (рис. 5, кривые 1, 2, 3,  $I_1 > I_2$ ) и СФ2-2 и лампочки «Тесла» (кривые 4, 5  $I_4 > I_5$ ) снимались с помощью генератора НГПК и осциллографа С1-19 с двумя блоками БПУ-1. Кривые даны в относительном масштабе (в делениях шкалы осциллографа).

**Стабильность параметров во времени.** Для определения стабильности пар авторами использовались фотосопротивления типов ФС-К2Н и

СФ2-2 в сочетании с лампочкой МИН-3. Было изготовлено 16 комплектов пар и поставлено на старение. Через определенное время снималась зависимость  $R_{\phi} = f(I_{\lambda})$ , по которой рассчитывалось относительное изменение сопротивления  $\frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi}} = \varphi(t)$  для определенных значений тока и напряжения на лампочке. На стабильность пары оказывает влияние старение как лампочек, так и фотосопротивлений. Процесс старения

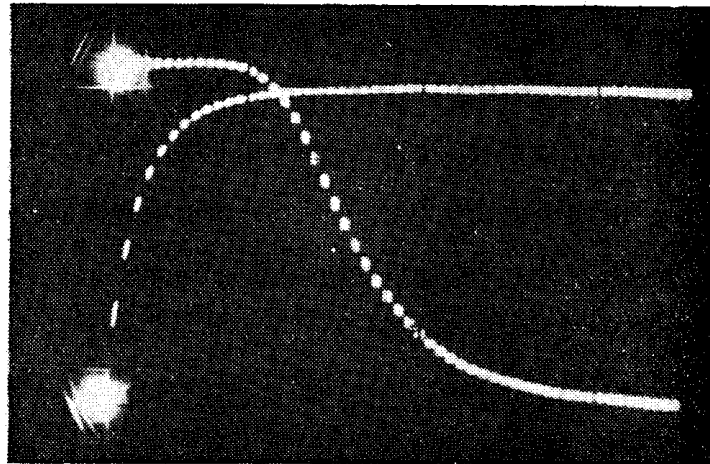


Рис. 4. Переходная характеристика лампочки накаливания МИН-3: вниз—включение, вверх — выключение.

весьма сложен и определяется в основном испарением вольфрама в вакууме, а также рекристаллизацией волокнистой структуры нити. Скорость испарения, а следовательно, и срок службы лампочек, весьма резко зависит от температуры накаленной нити, являющейся, в свою

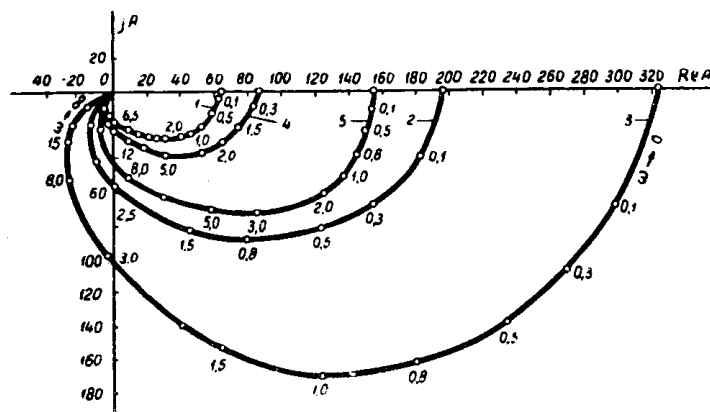


Рис. 5.

очередь, функцией тока  $I_{\lambda}$ . Экспериментальные исследования показывают (рис. 6), что в течение первых 100—200 часов происходит интенсивное старение, обусловленное в основном рекристаллизацией нити, а затем, при условии, что ток лампочки на 10—20% ниже номинального, параметры лампочек становятся весьма стабильными. Срок службы лампочек МИН-3 при 10% -недокале составляет около 7000 часов и резко увеличивается с уменьшением тока.

Старение фотосопротивлений из CdS, как указывалось в [5], длится 300 ÷ 400 часов. Максимальная величина изменения  $\frac{\Delta R_{\Phi}}{R_{\Phi}}$  за это время достигает 40%, далее нестабильность резко уменьшается и изменение отношения  $\frac{\Delta R_{\Phi}}{R_{\Phi}}$  за 7000 часов не превышает 3—5%. Причем на стабильность пары в целом за первые 300—400 часов большее влияние оказывает старение лампочек.

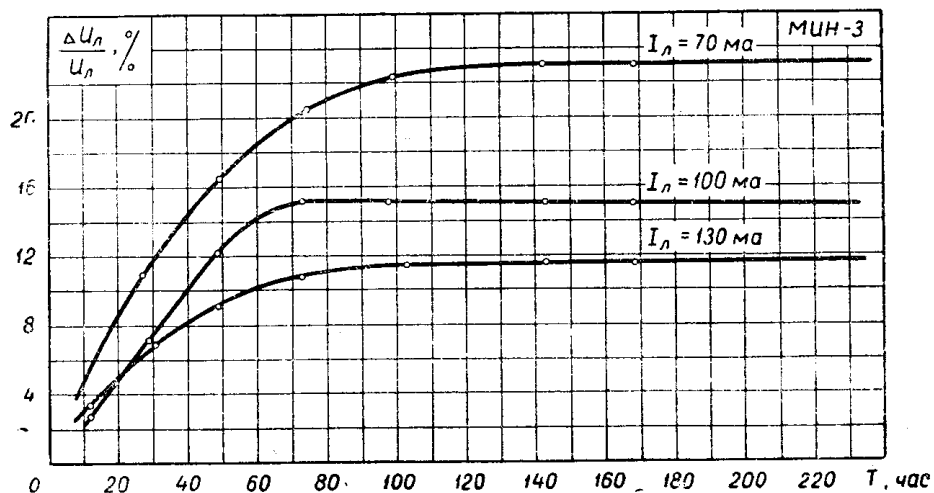


Рис. 6. Старение лампочки накаливания МИН-3.

Исследования пар, прошедших старение, на кратковременную нестабильность показали, что изменение  $\frac{\Delta R_{\Phi}}{R_{\Phi}}$  за 8 часов непрерывной работы не превышает 0,2%.

**Температурные характеристики.** Температурные характеристики управляемого элемента в основном определяются температурными зависимостями фотосопротивлений. Изменение проводимости ФС из CdS типов СФ2-2 и ФС-К2Н мало в интервале температур от +10°C до +35°C. Вне этого интервала ТКС возрастает. ТКС в интервале температур от 0°C до 50°C для СФ2-2 составляет в среднем (для 7 образцов) 0,37%/°C, а для фотосопротивлений типа ФСК-2Н не превышает 0,12%/°C.

**Фото- и термо-ЭДС фотосопротивлений.** Для измерения фото-э.д.с. фотосопротивление освещалось лампой накаливания 220 в., 150 вт. через тепловой фильтр. Освещенность ФС составляла 360 лк. Значение фото-э.д.с. в среднем для 7 образцов ФС типа СФ2-2 равно 37 мкв., термо-э.д.с. СФ2-2 составляет примерно 3,7 мкв. Фото-э.д.с. фотосопротивлений СФ2-2 при освещении лампочкой типа МИН-3 равна 1,5 мкв., а при уменьшении тока составляет доли микровольта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Шашков и А. С. Касперович. Динамические свойства цепей с термисторами. Госэнергоиздат, Москва, 1962.
2. В. С. Попов. Подогревное сопротивление для телеизмерений линейных перемещений. «Измерительная техника», № 1, 1962.

3. М. С. Ройтман, В. К. Жуков. Применение фотосопротивлений для стабилизации напряжения. (Труды II конференции). Издательство Сибирского отделения АН СССР. Новосибирск, 1962.

4. С. В. Свечников. Бесконтактный фотопотенциометр. «Автоматика и телемеханика», том XXIV, № 9, 1963.

5. Б. Т. Коломиец, А. О. Олеск. Характеристики фотосопротивлений из поликристаллического CdS. «Электричество», № 11, 1951.