

РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Ю. М. ФОМИЧЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры радиотехники)

Одним из узловых элементов в системах автоматического регулирования источников калиброванного напряжения является регулирующее устройство (РУ), которое изменяет амплитуду выходных колебаний в соответствии с законом управляющего сигнала.

Устройства, пригодные для осуществления этой операции, можно разделить по времени выполнения ее на инерционные и безынерционные, и по связи между входным и управляющим сигналами на РУ с гальванической связью и без гальванической связи.

Наилучшими характеристиками из современного арсенала инерционных электрически управляемых элементов обладают фотоэлектрические преобразователи (ФП). ФП характеризуются большим коэффициентом передачи, отсутствием гальванической связи между управляемой и управляющей цепями, способностью работать в цепях постоянного и переменного токов, хорошей кратковременной и приемлемой долговременной стабильностью, сравнительно малой инерционностью.

Основные характеристики источников света и фоторезисторов, выпускаемых отечественной промышленностью, пригодных для составления ФП, приведены в табл. 1, 2.

Регулирующие устройства на ФП строятся в виде электрически управляемого делителя. В цепь управления включаются источник света, а в управляемую — фотосопротивление (рис. 1).

Основными характеристиками, определяющими возможность применения РУ в источниках калиброванного напряжения, являются крутизна регулирования и вносимые им в основной сигнал искажения. Характеристики ФП, от которых зависит крутизна регулирования, достаточно полно рассмотрены в работах [1, 2]. Здесь же мы остановимся на втором, не менее важном, параметре РУ. При построении РУ в виде управляемого делителя (рис. 1) появление в цепи высших гармонических составляющих и их амплитуда будут определяться свойствами фо-

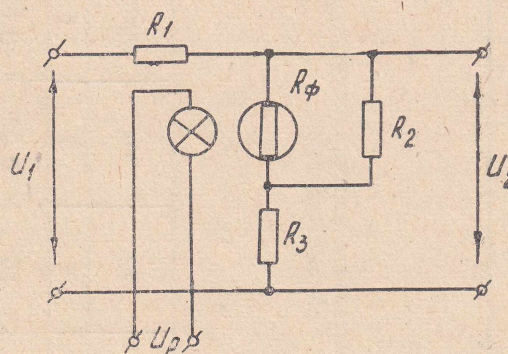


Рис. 1.

№№ п/п	Тип ламп	Световые и электрические параметры ламп				Продолжи- тельность горения	Габаритные размеры			Конструкция цоколя	Конструкция ламп
							диаметр колбы	длина лампы без цоколя	общая длина		
							<i>мм</i>	<i>мм</i>	<i>мм</i>		
		<i>в</i>	<i>ма</i>	<i>вт</i>	<i>лм/св</i>	<i>часы</i>					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	HCM1,2-25	1,2	25	0,03	0,05	80	2	5	5	—	Односторон.
2	HCM1,5-50	1,5	50	0,075	0,15	20	3,2	9	14	Резьбовой	Односторон. с купол.
3	HCM1,5-50-2	1,5	50	0,075	0,15	20	3,2	9	9	—	“
4	HCM2-40	2	40	0,08	0,1	200	3,2	7	7	—	Односторон.
5	HCM6-90	6	90	0,5	1,0	2000	3,2	7	9	Штифтовый	“
6	HCM6-90-2	6	90	0,5	1,0	2000	3,2	7	7	—	“
7	HCM6,3-20	6,3	20	0,12	0,2	500	3,2	7	9	Штифтовый	“
8	HCM6,3-20-2	6,3	20	0,12	0,2	500	3,2	7	7	—	“
9	HCM9-60	9	60	0,5	1,5	300	3,2	7	9	Штифтовый	“
10	HCM9-60-2	9	60	0,5	1,5	300	3,2	7	7	—	“
11	HCM10-55	10	55	0,5	0,8	1000	3,2	7	9	—	“
12	HCM10-55-2	10	55	0,5	0,8	1000	3,2	7	7	Штифтовый	Односторон.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	HCM12-5	12	5	0,06	0,002	1000	3,2	7	7	—	— „ —
14	HCM3,5×60	3,5	60	0,2	2,0	100					
15	HCM6×150	6	150	0,9	4,0	200	3,3	10	10	—	Софитная

Тип светодиода	Цвет свечения	Прямой ток $I_{пр}$ (ма)	Яркость при прямом токе B (нит) не менее	Прямое напряжение $U_{пр}$ (в)	Максимал. допустим. ампл. обр. напряж.	Температур. диапазон
АЛ 102 А	красный	5	5	3,2	6	-60°+70°C
АЛ 102 Б	красный	20	40	4,5	6	-60°+70°C
АЛ 102 В	зеленый	30	50	5	6	-60°+70°C

Таблица 2

Параметры	Допустим. мощность рассеив. (вт)	Рабоч. напряж. (в)	Световой ток (мкА)	Темновой ток (мкА)	R_T/R_{CB} при 200° лк	R_T ом	Интегр. чувствит. а/лк	Пост. времени мсек	Величина шумов мкв/Гц $_{1/2}$	Примечание
ФСК—2Н	0,125	100	1000	10	100	$3,3 \cdot 10^3$	0,5	120 80	—	справочные
ФС—2	0,05	2	1·100	0,5—0,2	3000	$2 \cdot 10^3$	0,36	40 15	1—4	“
ФС—3—2	0,1	5	2000	0,5	4000	$5 \cdot 10^3$	—	— —	1—4	“
ФСК—Г7	0,35	50	2000	5	400	$5 \cdot 10^3$	0,7	— —	—	“
СФ2—5	0,25	2	—	—	$10^4—10^5$	10^7	—	— —	1—4	опытные
бОС—4—681—010	0,25	10	—	—	$10^4—10^6$	$10^7—10^9$	—	— —	—	“

Отношение R_T/R_{CB} для фоторезисторов ОС—4—681—010 определено для освещенности 100 лк.

тоэлектрического преобразователя. Уравнение, связывающее фототок с напряжением и световым потоком, имеет вид [3]

$$I_{\phi} = D \cdot U_{\phi}^{\gamma} \cdot \Phi^{\alpha}, \quad (1)$$

где D — постоянная, определяемая свойствами материала и конструкцией фоторезистора, γ и α — коэффициенты нелинейности вольт-амперной и световой характеристик.

Рассмотрим подробнее это выражение. Вначале примем $\alpha = \gamma = 1$, тогда появление высших составляющих в фототоке возможно только при условии модуляции светового потока с частотой Ω , кратной частоте приложенного напряжения (ω). Например, если $U_{\phi} = U \cos \omega t$, а $\Phi = \Phi_0 + \Phi_m \cos \Omega t$, то при $\Omega = \omega$

$$I_{\phi} = \frac{1}{2} DU \Phi_m + DU \Phi_0 \cos \omega t + \frac{1}{2} DU \Phi_m \cos 2\omega t,$$

т. е. в фототоке появляется составляющая с частотой 2ω , при $\Omega = 2\omega$ с частотой 3ω и т. д. Действительно, в широкополосных ИКН это явление наблюдается в области низких частот, когда работа фильтров в цепи управляющего сигнала становится менее эффективной, а постоянная времени преобразователей соизмерима с периодом основного сигнала. Более подробно, правда с учетом нелинейности только световой характеристики фотосопротивления, этот вопрос рассмотрен в [2, 4].

На более высоких частотах модуляция светового потока практически будет отсутствовать и можно принять $\Phi = \text{const}$, тогда выражение (1) преобразуется в уравнение вольт-амперной характеристики фоторезистора:

$$I_{\phi} = B \cdot U_{\phi}^{\gamma},$$

где $B = D\Phi^{\alpha}$.

Вносимые же искажения будут определяться показателем нелинейности γ .

Отклонение вольт-амперной характеристики от линейной наблюдается у фотосопротивлений на двух участках, в области напряжения, значительно меньших, чем рабочее, из-за неомичности контактов. На этом участке наибольшего значения $\gamma = 2$ достигает у прессованных сернисто-кадмиевых и селенисто-кадмиевых сопротивлений типа ФСК, ФСД. Второй случай отклонения встречается при очень больших напряжениях, из-за изменения концентрации или подвижности носителей тока. Здесь γ может принимать значения 0,2—0,4 [4]. У пленочных фотосопротивлений, особенно для типов СФ 2-2, СФ 2-3, СФ-2-5, это явление наблюдается в значительно меньшей мере, однако несмотря на это при жестких требованиях к нелинейным искажениям РУ (в прецизионных источниках $K_{\Gamma} \leq 0,01 \div 0,03\%$) нелинейность вольтамперной характеристики этих фоторезисторов приходится учитывать, а в ряде случаев принимать специальные меры по линеаризации.

Для анализа нелинейных искажений РУ на ФП воспользуемся методикой, базирующейся на исследовании степени изменения мгновенного коэффициента передачи под действием мгновенного напряжения сигнала [5].

Используя эту методику, найдем выражение для коэффициентов гармоник выходного напряжения РУ, построенного по схеме рис. 1.

При анализе принимается, что световой поток остается неизменным $\Phi = \text{const}$ и цепь прохождения основного сигнала безынерционна. Мгновенный коэффициент передачи регулирующего устройства (рис. 1) определится следующим выражением:

$$K_g(U) = \frac{R_2 R_3 + R_{\phi}(U)(R_2 + R_3)}{R_2(R_1 + R_3) + R_{\phi}(U)(R_1 + R_2 + R_3)}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что непостоянство мгновенного коэффициента передачи $K_g(U)$ обусловлено зависимостью от напряжения сигнала параметра $R_\phi(U)$. При малых напряжениях на фотосопротивлении зависимость $R_\phi(U)$ можно разложить в ряд Тейлора по степеням U_ϕ :

$$R_\phi(U) R_{\phi 0} + R'_\phi U_\phi + \frac{1}{2} R''_\phi U_\phi^2, \quad (3)$$

где $R_{\phi 0}$ — величина фотосопротивления, определяемая световым потоком;

R'_ϕ — первая производная в точке $U_\phi = 0$;

R''_ϕ — вторая производная в этой же точке.

Обозначив отношение напряжения на фотосопротивлении (U_ϕ) к выходному (U_2) через коэффициент включения

$$K_{\text{вк}} = \frac{U_\phi}{U_2} = \frac{R_{\phi 0} \cdot R_2}{R_2 \cdot R_3 + R_{\phi 0} (R_2 + R_3)} \quad (4)$$

и проделав согласно [5] преобразования, получим

$$K_{r2} = \frac{1}{4} (a - K_g b) \frac{R'_\phi}{R_{\phi 0}} \cdot \frac{1}{K_g} \cdot U_\phi; \quad (5)$$

$$K_{r3} = \frac{1}{12} \left[\frac{1}{2} (a - K_g b) \frac{R''_\phi}{R_{\phi 0}} + a (K_g a - b) \left(\frac{R'_\phi}{R_{\phi 0}} \right)^2 \right] \frac{1}{K_g} U_\phi^2, \quad (6)$$

где K_g — коэффициент передачи РУ при $R_\phi(U) = R_{\phi 0}$;

$$a = \frac{R_{\phi 0} (R_2 + R_3)}{R_2 (R_1 + R_3) + R_{\phi 0} (R_1 + R_2 + R_3)};$$

$$b = \frac{R_{\phi 0} (R_1 + R_2 + R_3)}{R_2 (R_1 + R_3) + R_{\phi 0} (R_1 + R_2 + R_3)}.$$

Полученные выражения (5, 6) показывают, что амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения регулирующего устройства возрастает с увеличением напряжения, падающего на фотосопротивлении. При этом третья гармоника растет значительно быстрее, так как зависит от квадрата приложенного к ФС напряжения. Входящий в оба выражения член $\left(1 - K_g \frac{b}{a} \right)$ показывает зависимость нелинейных искажений от режима работы фоторезистора.

Рассмотрим возможности уменьшения нелинейных искажений РУ на фотопреобразователе. Очевидно этого достичь можно уменьшением напряжения на ФС, при неизменном коэффициенте передачи, либо изменением режима работы ФС. Уменьшение U_ϕ при постоянном входном и выходном сигнале достигается введением добавочного сопротивления (R_3) в цепь ФС. При этом уменьшение будет происходить и за счет изменения U_ϕ и за счет коэффициента включения ($K_{\text{вк}}$).

Действительно, при $R_2 \rightarrow \infty$ получим, что $a = b = K_{\text{вк}} \cdot K_g$, с учетом этого выражения (5, 6) приводятся к виду

$$K_{r2} \approx \frac{1}{4} (1 - K_g) \frac{R'_\phi}{R_{\phi 0}} \cdot K_{\text{вк}} \cdot U_\phi;$$

$$K_{r3} \approx \frac{1}{24} (1 - K_g) \frac{R''_\phi}{R_{\phi 0}} \cdot K_{\text{вк}} \cdot U_\phi^2,$$

где

$$K_{\text{вк}} = \frac{R_{\phi_0}}{R_3 + R_{\phi_0}} < 1.$$

Уменьшить нелинейные искажения РУ при тех же самых условиях, т. е. $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}} = \text{const}$ и неизменной величине R_{ϕ} , можно шунтированием его активным сопротивлением (R_2). При $R_3 = 0$, $a = K_g$, $b = K_g \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$, а выражения (5, 6) примут вид:

$$K'_{\Gamma_2} = \frac{1}{4} \left(1 - K_g - K_g \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{R'_{\phi}}{R_{\phi_0}} \cdot U_{\phi};$$

$$K'_{\Gamma_3} = \frac{1}{24} \left(1 - K_g - K_g \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{R''_{\phi}}{R_{\phi_0}} \cdot U_{\phi}^2.$$

В случае, когда R_{ϕ} не шунтируется, т. е. $R_2 \rightarrow \infty$, в приведенных выражениях будут отсутствовать члены $K_g \cdot \frac{R_1}{R_2}$, установив это, определим, насколько изменится K_{Γ} при введении R_2 :

$$n = \frac{K'_{\Gamma_2}}{K_{\Gamma_2}} = \frac{K'_{\Gamma_3}}{K_{\Gamma_3}} = \frac{1 - K_g}{1 - K_g - K_g \frac{R_1}{R_2}},$$

где n — число, показывающее во сколько раз уменьшатся нелинейные искажения РУ при шунтировании фотосопротивления. Поскольку введение по отдельности R_2 или R_3 приводит к изменению входного и выходного сопротивлений РУ, то часто используют комбинированные включения, как показано на рис. 1, при этом

$$n = \frac{1 - K_g}{\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - K_g \left(1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_1}{R_2}\right)} \cdot \frac{1}{K_{\text{вк}}}.$$

Коэффициент включения определяется выражением (4).

Указанные способы линеаризации приводят к изменению других важных характеристик РУ, таких, как динамический диапазон и крутизна регулирования.

Если принять за динамический диапазон РУ

$$D = \frac{U_{\text{вых max}}}{U_{\text{вых min}}} = \frac{K_g \text{ max}}{K_g \text{ min}} \Big|_{U_{\text{вх}} = \text{const}},$$

то в пределе, при R_{ϕ} , изменяющемся от 0 до ∞ , получим:

1) Введение R_3 ограничивает минимальный коэффициент передачи величиной $K_{g \text{ min}} = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$.

2) Введение R_2 — максимальный $K_{g \text{ max}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

3) При подстановке R_2 и R_3 ограничение будет происходить с обеих сторон и

$$D_{\text{пред}} = \frac{(R_2 + R_3)(R_1 + R_3)}{R_3(R_1 + R_2 + R_3)}.$$

Для выяснения изменения величины крутизны регулирования найдем относительные коэффициенты передачи dK_g/K_g схем с линеаризацией и без нее, а затем возьмем их отношение.

При $R_2 \rightarrow \infty$ и $R_3 = 0$

$$\frac{dK_g}{K_g} = \frac{R_1}{R_1 + R_\phi} \cdot \frac{dR_\phi}{R_\phi}$$

Рассмотрим приведенные ранее 3 случая:

а) введено добавочное сопротивление R_3 .

$$\frac{dK'_g}{K'_g} = K_{BK} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_\phi} \cdot \frac{dR_\phi}{R_\phi};$$

$$m' = \frac{dK_g/K_g}{dK'_g/K'_g} = \frac{1}{K_{BK}};$$

б) фотосопротивление зашунтировано R_2 .

$$\frac{dK''_g}{K''_g} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_\phi (R_1 + R_2)} \cdot \frac{dR_\phi}{R_\phi};$$

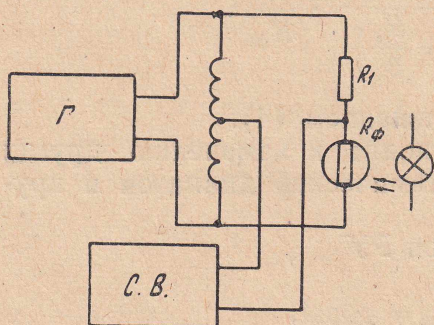
$$m'' = \frac{dK_g/K_g}{dK''_g/K''_g} = \frac{1 - K_g}{K_g} \cdot \frac{R_\phi}{R_1} \rightarrow n;$$

в) поставлены R_2 и R_3 .

$$m''' = \frac{dK_g/K_g}{dK'''_g/K'''_g} = \frac{1}{K_g} \cdot \frac{1}{K_{BK}^2} \cdot \frac{R_\phi}{R_1 + R_\phi}$$

Таким образом, если коэффициент передачи после введения линеаризующих сопротивлений остается неизменным, т. е. $K_g = K'_g = K''_g = K'''_g$ и напряжение на фотосопротивлении то же самое, то, во сколько

раз мы выигрываем в нелинейных искажениях, почти во столько же проигрываем в крутизне регулирования. В связи с тем, что в справочной литературе для фоторезисторов приводится линейная вольт-амперная характеристика и соответственно принимается, что величина R_ϕ не зависит от приложенного к нему напряжения, то количественный расчет нелинейных искажений с помощью полученных выражений затруднителен*). Снимать же вольтамперные характеристики или зависимость $R_\phi(U_\phi)$, особенно для таких фоторезисторов как СФ 2-2, СФ 2-3, СФ 2-5, СФ 2-8 и др., которые имеют малые отклонения γ от единицы, весьма трудоемкий процесс, требующий применения прецизионной аппаратуры, что не



Г - ГЗ-33

СВ - С5-2

Рис. 2.

всегда возможно и желательно. Кроме того, эти характеристики не идентичны для различных фотосопротивлений даже из одной партии и зависят от степени освещенности фоторезистора.

В этой связи нами были проведены исследования непосредственно нелинейных искажений, возникающих в цепи с фотосопротивлением. Схема эксперимента приведена на рис. 2. Индуктивный делитель с коэффициентом передачи $1/2$, фоторезистор и последовательно включенное

*) Качественная картина описываемого процесса вполне достоверна, об этом свидетельствует и ход экспериментальных кривых (рис. 5).

с ним линейное сопротивление образуют мост. В одну диагональ его включен генератор синусоидальных напряжений (Γ), а в другую селективный милливольтметр (СВ). Изменяя величину ФС, мост балансируется по 1-й гармонике. При этом, если отсутствуют фазовые сдвиги, будут скомпенсированы и высшие гармоники генератора. Возникающие же гармонические составляющие за счет нелинейности ФС выделяются в диагонали моста и могут быть замерены селективным вольтметром.

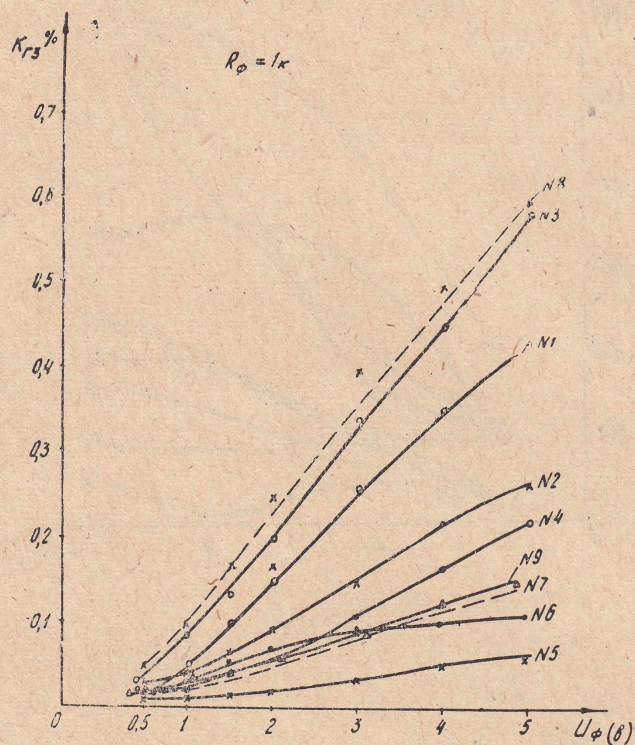


Рис. 3.

Изменяя выходное напряжение генератора, можно снять зависимость $K_r = f(U_{\phi})$, а устанавливая различные величины R_1 (при балансе $R_1 \approx R_{\phi}$), зависимость $K_r = f(R_{\phi}, U_{\phi})$.

Снятые таким образом коэффициенты второй и третьей гармоник в выходном напряжении РУ с фотосопротивлениями типа СФ 2-5 приведены на рис. 3, 4, 5.

Из приведенных графиков следует, что:

- 1) в цепях с ФС преобладают нечетные гармоники;
- 2) при напряжениях, не превосходящих U рабочее, третья гармоника зависит от квадрата приложенного напряжения.
- 3) 2-ая гармоника зависит от U_{ϕ} линейно до $U_{\phi} = U_{\text{раб}}$, а при больших напряжениях для некоторых образцов наблюдается даже падающий участок $K_{r2}(U_{\phi})$;
- 4) имеется довольно сильная зависимость K_r от выбранного значения R_{ϕ} , причем эта зависимость обостряется при увеличении U_{ϕ} ;
- 5) наблюдается разброс значений K_r для различных образцов ФС даже из одной партии.

Для определения границ разброса K_r нами были исследованы по 10 образцов фотосопротивлений из трех различных партий СФ 2-5 выпуска 1968—1969 гг. Результаты приведены на гистограммах рис. 6 для второй и третьей гармоники при $U_{\phi} = U_{\text{раб}}$.

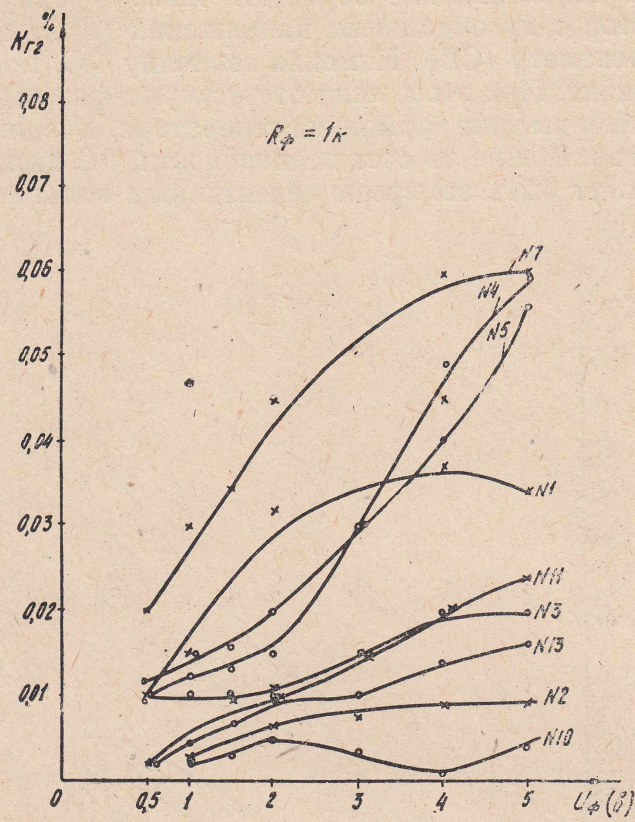


Рис. 4.

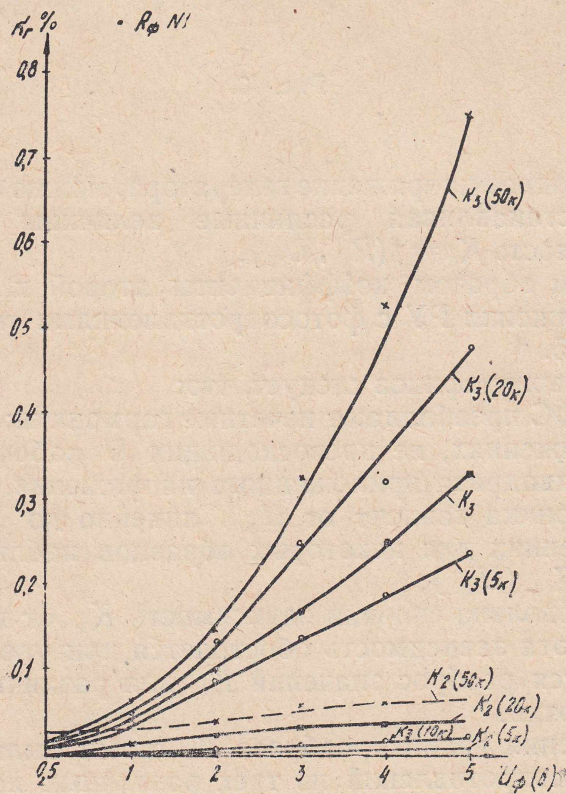


Рис. 5.

Отсюда можно заключить, что основное количество фоторезисторов типа СФ 2-5 имеют нелинейные искажения в пределах $0,1 \div 0,2\%$ при напряжениях, не превышающих $U_{\text{раб}}$.

Ранее были рассмотрены несколько схемных вариантов РУ на фотоэлектрических преобразователях. Из других возможных построений наиболее интересным является дифференциальное включение ФП (рис. 7).

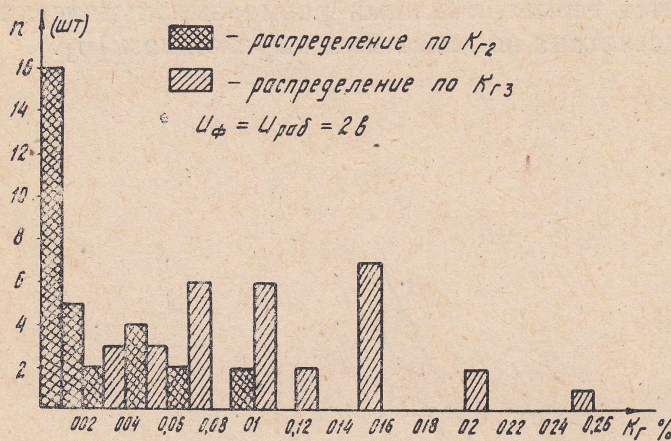


Рис. 6.

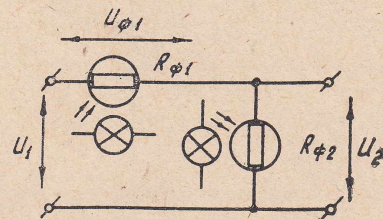


Рис. 7.

Рассмотрим эту схему несколько подробнее. Крутизна регулирования, которая, как отмечалось выше, эквивалентна относительному коэффициенту передачи:

$$S_p \cdot \frac{dK_g}{K_g} = \frac{R_{\phi 1}}{R_{\phi 1} + R_{\phi 2}} \left[\frac{dR_{\phi 2}}{R_{\phi 2}} + \frac{dR_{\phi 1}}{R_{\phi 1}} \right],$$

и для такой схемы при идентичных преобразователях и $R_{\phi 1} = R_{\phi 2}$ в два раза больше, чем для РУ с одним ФП.

Коэффициенты гармоник, определенные для этой схемы по ранее предложенной методике, равны

$$K_{r2} \approx \frac{1}{4} \left[(1 - K_g) K_g \frac{R'_{\phi 2}}{R_{\phi 2}} U_{\phi 2} - \frac{R_{\phi 1}}{R_{\phi 2}} K_g^2 \frac{R'_{\phi 1}}{R_{\phi 1}} U_{\phi 1} \right];$$

$$K_{r3} \approx \frac{1}{24} \left[(1 - K_g) K_g \frac{R''_{\phi 2}}{R_{\phi 2}} U_{\phi 2}^2 - K_g \frac{R_{\phi 1}}{R_{\phi 2}} \cdot \frac{R''_{\phi 1}}{R_{\phi 1}} U_{\phi 1}^2 \right].$$

Из последних выражений следует, что при одинаковых преобразователях, одинаковом режиме ($R_{\phi 1} = R_{\phi 2}$) и коэффициенте передачи, равном 0,5, возможна полная компенсация вносимых фоторезисторами искажений.

Это положение было проверено экспериментально, в схеме рис. 2, линейное сопротивление было заменено ФП, в остальном порядок остался прежним. Полученные результаты приведены на графике рис. 8, где кривые 1 и 2 отражают ход K_{r3} для $R_{\phi 1}$ и $R_{\phi 2}$, снятые по описанной ранее методике.

Кривая 3 показывает зависимость K_{r3} от $U_{\text{вых}} = U_{\phi}$: при дифференциальном включении этих же фотопреобразователей.

В реальных условиях добиться полной компенсации нелинейных искажений конечно нельзя, тем более, что при работе РУ изменения R_{ϕ} будут происходить в разные стороны. Однако совершенно очевидно, что такое включение при значительном выигрыше в крутизне регулирования не приведет к увеличению K_r , и кроме того в этом случае открываются более широкие возможности линейризации РУ описанными выше способами, если оставить S_p как при одном преобразователе.

Частотные свойства регулирующего устройства определяются реактивностями составляющих его элементов и, в частности, реактивностями фоторезистора. При повышенных частотах ФС можно представить как последовательно соединенную индуктивность вводов (L_{ϕ}) с активным сопротивлением (R_{ϕ}), зашунтированной емкостью (C_{ϕ}).

Величина L_{ϕ} определяется геометрическими размерами и материалом вводов и может быть рассчитана по известным выражениям [6].

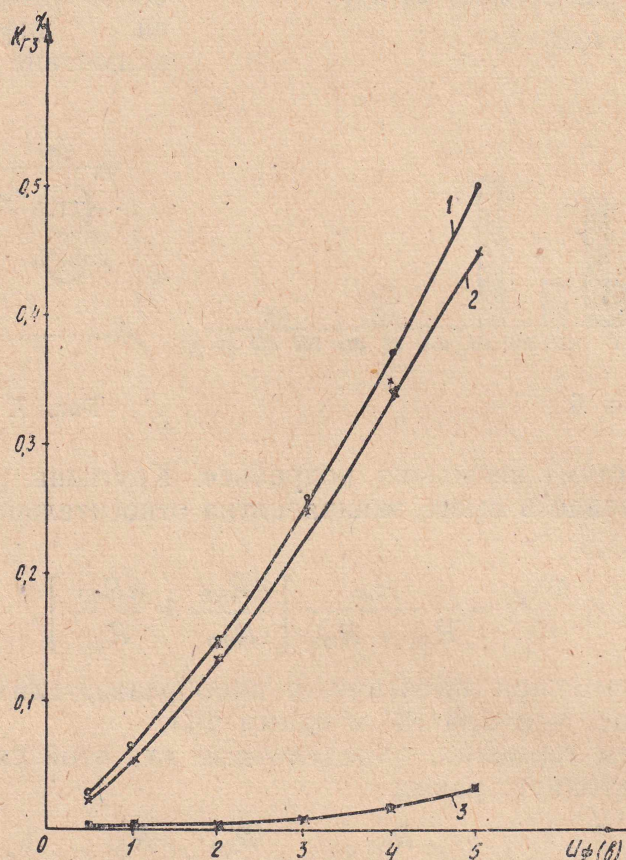


Рис. 8.

Расчет емкости C_{ϕ} произвести гораздо труднее, поскольку многие необходимые размеры ФС в справочной литературе не приводятся и измерить их практически невозможно.

Нами были проведены измерения емкостей нескольких партий различных фоторезисторов с помощью измерителя емкостей Е12-1; как показали исследования, разброс для однотипных ФС составил 01-03 пф, поэтому для расчетов можно вполне пользоваться средними данными, приведенными в табл. 3.

Реактивности L_{ϕ} и C_{ϕ} будут приводить к частотной зависимости двух параметров РУ — коэффициента передачи (K_g) и крутизны регулирования (S_p). Расчет частотной характеристики, т. е. $K_g(\omega)$, надо проводить в каждом конкретном случае, здесь же мы рассмотрим изменение относительной чувствительности фоторезистора S_{ϕ} . Обозначим для постоянного тока

$$\frac{dR_{\phi}}{R_{\phi}} = S_{\phi 0}.$$

Согласно эквивалентной схеме

$$Z_{\phi} = Z_L + \frac{Z_c \cdot R_{\phi}}{Z_c + R_{\phi}}$$

и

$$\frac{dZ_{\phi}}{Z_{\phi}} = S_{\phi\omega} = \frac{Z_c^2 \cdot R_{\phi}}{[Z_L(R_{\phi} + Z_c) + R_{\phi}Z_c](R_{\phi} + Z_c)} \cdot \frac{dR_{\phi}}{R_{\phi}}$$

Используя эти выражения, найдем, насколько чувствительность фотосопротивления ниже на частоте ω по сравнению с постоянным током

$$A = \frac{S_{\phi 0}}{S_{\phi \omega}} \approx \sqrt{1 + \omega^2 \left(C_{\phi} R_{\phi} + \frac{L_{\phi}}{R_{\phi}} \right)^2}$$

Из этого выражения по заданным значениям A и ω , при известных C_{ϕ} (табл. 3) и L_{ϕ} можно определить необходимую величину R_{ϕ} .

Таблица 3

Тип фоторезистора	Емкость $n\phi$	Граничная частота, мгц
СФ 2-5	1,8	90
СФ 2-8	1,7	2,5
СФ 2-2	3,1	5,1
СФ 3-2	2,7	15
ФС-К2	2,2	36
ОС-4-681-010	4,7	68
ФСК-Г7	2,2	6

Граничная частота рассчитана по выражению 7 для уровня $\sqrt{2}$, R_{ϕ} взято при освещенности в 200 лк, а $L_{\phi} = 0$.

Проведенные исследования регулирующих устройств на фотоэлектрических преобразователях позволяют сделать следующие выводы:

1) РУ на ФП строятся в виде электрически управляемого делителя. Управляющую цепь составляет источник света, в качестве которого могут использоваться либо ЛН, либо ПП диоды со светящимся pn -переходом. В состав управляемой цепи входит фоторезистор. Наиболее пригодными для РУ в настоящее время являются фотосопротивления типа СФ 2-5.

2) Максимальный динамический диапазон РУ с одним преобразователем достигает (40—50) дб, а при дифференциальном включении ФП может достигать до 100 дб.

3) Реальная крутизна регулирования для РУ с одним ФП равна 2÷5, а при дифференциальном включении двух преобразователей—4-10.

4). Нелинейность вольт-амперной характеристики фоторезистора приводит к появлению высших составляющих в выходном сигнале РУ. При этом преобладает 3-я гармоника, которая зависит от квадрата приложенного к ФС напряжения.

5). Имеется резкая зависимость K_r от величины сопротивления фоторезистора. Причем, чем больше R_{ϕ} , тем больше искажения.

6). Возможные способы линеаризации приводят к сужению динамического диапазона и крутизны регулирования. Наиболее эффективным способом уменьшения K_r является уменьшение напряжения на фоторезисторе.

7). Дифференциальное включение ФП при идентичных преобразователях и одинаковых R_{ϕ} может дать полную компенсацию высших составляющих.

8) Частотная применимость РУ на ФП определяется реактивностями фоторезистора и величиной $R_{\text{фо}}$. Наиболее широкополосными в настоящее время являются ФС типа СФ 2-5.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, А. И. Лысов. Фотоэлектрический преобразователь как управляемый элемент электрической цепи. Изв. вузов — Приборостроение, № 6, 1966.
 2. В. Ф. Аникин. Разработка и исследование стабилизирующих устройств переменного напряжения с фотоэлектрическими преобразователями. Диссертация, Томск, 1970.
 3. В. Свечников. Фотосопротивления как элементы электрической цепи. Автоматика и телемеханика № 4, 1959.
 4. С. Ф. Корндорф и др. Расчет фотоэлектрических цепей. Изд-во «Энергия», М., 1967.
 5. В. Д. Иванченко. Нелинейные искажения в усилителях на транзисторах. Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. Сб. статей под редакцией И. Ф. Николаевского, вып. 2, изд-во «Связь», М., 1968.
 6. Л. А. Цейтлин. Индуктивности проводов и контуров. Госэнергоиздат, М.—Л., 1950.
-