

ПОГРЕШНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Ю. М. ФОМИЧЕВ, М. С. РОЙТМАН

(Представлена научным семинаром кафедры радиотехники)

Погрешность компаратора определяется его чувствительностью, степенью влияния внешних возмущающих факторов, временной нестабильностью параметров измерительного преобразователя, его частотной характеристикой, асимметрией и ошибкой перехода.

При измерении напряжения в области низких или высоких частот основное значение приобретает частотная погрешность (δ_f) преобразователя. Остальные ошибки, по сравнению с ней, являются величинами второго порядка малости и их влиянием, в первом приближении, можно пренебречь.

В связи с этим выражение для частотной погрешности компарирования можно записать в следующем виде:

$$\delta_f = \frac{U_0 - U_f}{U_0},$$

где U_f — действующее значение измеряемого переменного напряжения, U_0 — постоянное напряжение, эквивалентное по действию переменному.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию ошибки в области высоких частот одного из наиболее перспективных типов преобразователей — фотоэлектрического.

Высокочастотная погрешность обусловлена реактивностями элементов, входящих в состав преобразователя, и эффектами, возникающими в цепях при протекании токов в. ч.

Для фотоэлектрического преобразователя (ФП) источниками такой погрешности являются:

- 1) поверхностный эффект;
- 2) неравномерность распределения переменного тока вдоль длины нагревателя;
- 3) реактивности вводных траверз и нити лампы накаливания (ЛН).

Поверхностный эффект проявляется в двух аспектах: в увеличении активного сопротивления цепи ЛН и увеличении индуктивности вводов и нити за счет внутреннего магнитного потока. Как показали исследования [2], эти составляющие частотной погрешности при геометрических размерах серийных ламп, пригодных для целей компарирования, достаточно малы и в частотном диапазоне до $200 \div 300$ мГц не являются определяющими.

Неодинаковая величина тока высокой частоты вдоль тела накала вызывает неравномерность распределения температуры, а следовательно светового потока и его спектрального состава. Реактивности же элементов цепи ЛН приводят к тому, что одинаковые величины действующего значения переменного и постоянного напряжений создают различные

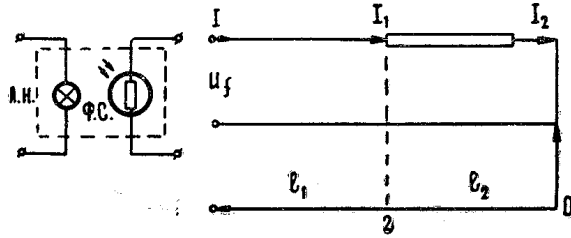


Рис. 1.

ФП как длинную линию. В общем случае линия будет неоднородной, поскольку физические размеры и параметры по длине ее не остаются постоянными. В связи с этим анализ проводится следующим образом: цепь ЛН разбивается на однородные участки (рис. 1), первый из которых является короткозамкнутым, а каждый из последующих нагружен на входное сопротивление предыдущего. Затем, используя уравнения длинной линии, определяется выражение для распределения тока (I_1) вдоль нити ЛН, в зависимости от частоты (ω) и погонных параметров линии (L, C, r) при заданном входном напряжении (U_f), в виде:

$$I_1 = U_f \cdot \dot{\varphi}(\xi, \omega, L, C, r),$$

где ξ — текущая координата.

Используя это выражение, можно найти среднее значение тока, протекающего по всей длине нити накаливания:

$$I_{cp} = \frac{1}{\xi} \int_0^{\xi} U_f / \varphi(\xi, \omega, L, C, r) / d\xi.$$

Далее, полагая, что светоприемник одинаково реагирует на I_{cp} и равную ему величину постоянного тока, выражения для частотной погрешности ФП (1) можно привести к виду:

$$\delta_f = 1 - \frac{1}{R_n \cdot \frac{1}{\xi} \int_0^{\xi} / \varphi(\xi, \omega, L, C, r) / d\xi}, \quad (2)$$

где R_n — сопротивление ЛН постоянному току в рабочей точке.

Для упрощения предположим, что эквивалентная (первичной цепи преобразователя) длинная линия состоит из двух однородных участков, образованных нитью накаливания и вводными траверзами. В этом случае получается следующее выражение модуля тока, протекающего по нагревателю:

$$|I_1| = U_f \times \frac{\sqrt{\text{ch}^2 \alpha_2 \xi_2 \cos^2 \beta_2 \xi_2 + \text{sh}^2 \alpha_2 \xi_2 \sin^2 \beta_2 \xi_2}}{\sqrt{[(E_2 A_1 + E_1 A_2) - (F_2 B_1 + F_1 B_2)]^2 + [(F_2 A_1 + F_1 A_2) + (E_2 B_1 + E_1 B_2)]^2}}, \quad (3)$$

где

$$A_1 = \text{sh} \alpha_2 l_2 \cos \beta_2 l_2 \text{ch} \alpha_1 l_1 \cos \beta_1 l_1 - \text{ch} \alpha_2 l_2 \sin \beta_2 l_2 \text{sh} \alpha_1 l_1 \sin \beta_1 l_1;$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \operatorname{ch} \alpha_2 l_2 \sin \beta_2 l_2 \operatorname{ch} \alpha_1 l_1 \cos \beta_1 l_1 + \operatorname{sh} \alpha_2 l_2 \cos \beta_2 l_2 \operatorname{sh} \alpha_1 l_1 \sin \beta_1 l_1; \\ A_2 &= \operatorname{ch} \alpha_2 l_2 \cos \beta_2 l_2 \operatorname{sh} \alpha_1 l_1 \cos \beta_1 l_1 - \operatorname{sh} \alpha_2 l_2 \sin \beta_2 l_2 \operatorname{ch} \alpha_1 l_1 \sin \beta_1 l_1; \\ B_2 &= \operatorname{ch} \alpha_2 l_2 \cos \beta_2 l_2 \operatorname{ch} \alpha_1 l_1 \sin \beta_1 l_1 + \operatorname{sh} \alpha_2 l_2 \sin \beta_2 l_2 \operatorname{sh} \alpha_1 l_1 \cos \beta_1 l_1; \end{aligned}$$

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ — постоянные затухания и фазовые для соответствующих участков линии;

E_1, F_1 и E_2, F_2 — составляют действительную и мнимую части характеристических сопротивлений этих участков.

Анализ выражения (3) позволяет сделать вывод, что картину распределения тока по длине нагревателя дает числитель его, а знаменатель представляет собой модуль полного сопротивления цепи нагревателя на переменном токе. Для оценки количественных соотношений рассмотрим следующий конкретный пример. Преобразователь выполнен в виде отрезка коаксиальной линии с диаметром внешнего проводника $D = 2 \cdot 10^{-2}$ м. Внутренний проводник составляют вводные траверзы ЛН диаметром $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $l = 2 \cdot 10^{-2}$ м и нить накаливания, диаметр которой $d = 5 \cdot 10^{-6}$ м, длина 10^{-2} м, а погонное сопротивление $R = 10^4$ ом/м. Полученные расчетные величины токов (из выражения 3) в начале и конце нити на частоте в 300 мГц различаются на $0,2 \cdot 10^{-2}\%$, что составляет величину настолько незначительную, которая, даже несмотря на высокую степень зависимости выходного параметра ФП от тока, может не учитываться. Выражение (2), в связи с этим, принимает более простой вид:

$$\delta_f = 1 - \frac{|Z_n|}{R_n}, \quad (4)$$

где $|Z_n|$ — это знаменатель из выражения (3), величина которого определяется геометрическими размерами и материалом составляющих элементов первичной цепи.

Ошибка сравнения, зависящая от величины реактивностей, определенная по формулам (3) и (4), при перечисленных выше параметрах преобразователя на частоте в 300 мГц составляет 18%.

Таким образом, из всего вышеизложенного следует, что погрешность ФП в области высоких частот в основном зависит от реактивностей элементов цепи нагревателя.

Рассчитывать частотную погрешность компанирования с использованием выражения (3) — довольно громоздкая задача. Более простое и наглядное решение получается с использованием эквивалентных схем ФП с сосредоточенными параметрами.

Действительно, длинная линия, в первом приближении, может быть заменена эквивалентной схемой рис. 2, если принять за L_n — суммарную индуктивность вводов и тела накала лампы, C_n — емкость их относительно экрана, а R_n — сопротивление ЛН в рабочей точке, то получим эквивалентную схему ФП с сосредоточенными параметрами.

Частотная погрешность определяется из выражения:

$$\delta_f = \frac{2}{3} \omega^2 C_n L_n - \frac{1}{2} \frac{\omega^2 \left[\frac{3}{2} L_n + \frac{1}{2} C_n R_n^2 \right]^2}{9/4 R_n^2}, \quad (5)$$

где ω — частота измеряемого напряжения.

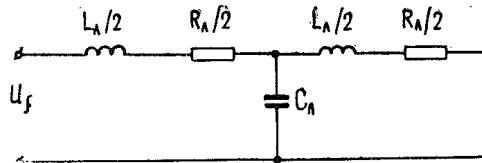


Рис. 2.

Величины C_L и L_L определяются по известным формулам [3] с учетом конструктивных размеров преобразователя. Для выяснения справедливости такого представления первичной цепи ФП воспользуемся ранее приведенным численным примером. Погрешность компарирования, рассчитанная по формуле (5), составляет 17,7% на 300 мГц. Таким образом различие между ранее полученным результатом и настоящим имеет вполне допустимую величину, кроме того при уменьшении частоты измеряемого напряжения эта разница будет сокращаться.

Наличие двух составляющих в последнем выражении, положительной и отрицательной, указывает на возможность компенсации частотной ошибки. Обозначив $\omega C_L R_L = a$, $L/C_L R_L^2 = K$, выражение (5) можно свести к виду:

$$\delta_f = -a^2 \left[\frac{1}{2} K^2 - \frac{1}{3} K + \frac{1}{18} \right].$$

Отсюда легко найти, что $\delta_f = 0$ при $K = \frac{1}{3}$.

Полученное соотношение можно использовать для определения оптимальных размеров преобразователя. Так при коаксиальной конструкции индуктивность и емкость внутреннего проводника равны:

$$L_L = \frac{\mu}{2\pi} l \cdot \ln \frac{D}{d}; \quad (6)$$

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon \cdot l}{\ln D/d}; \quad (7)$$

где l — длина участка;

D и d — наружный и внутренний диаметры коаксиала;

μ и ϵ — магнитная и диэлектрическая проницаемости.

Тогда

$$K = \frac{L_L}{C_L R_L^2} = \frac{\frac{\mu}{2\pi} l \cdot \ln \frac{D}{d}}{\frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{D}{d}} \cdot R_L^2},$$

откуда

$$\ln \frac{D}{d} = 2\pi R_L \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot \sqrt{K}.$$

При

$$K = \frac{1}{3}, \quad \epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \left[\frac{\phi}{\text{м}} \right];$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{гн}}{\text{м}} \right];$$

$$\ln \frac{D}{d} \approx 10^{-2} R_{\text{ЛХ}}$$

Исследования частотной погрешности компараторов на ФП проводились во ВНИИМ им. Менделеева сличением с образцовым компенсационным вольтметром типа ВЗ-24.

Для проведения эксперимента была разработана коаксиальная конструкция ФП, позволяющая совместить точки подключения преобразователя, образцового вольтметра и генератора в. ч. напряжения (рис. 3).

В работе исследовались ФП с опытными лампами накаливания софитной конструкции (разработанные А. И. Лысовым), в которых использованы нити от серийных ламп типа НСМ $6,3 \times 20$, НСМ 6×150 , НСМ $1,5 \times 50$. Функциональная схема эксперимента дана на рис. 4.

$$\begin{aligned} l_1 &= 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ l_2 = l_3 &= 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ l_4 &= 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ D &= 22 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ d_2 = d_3 &= 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ d_4 &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ d_1 &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

1. Лампа накаливания
2. Фотосопротивление
3. Измерительная головка ВЗ-24
4. Фишка для подключения источника переменного напряжения

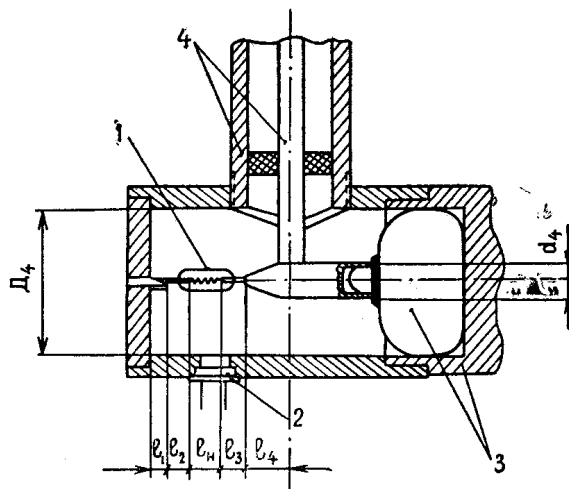


Рис. 3.

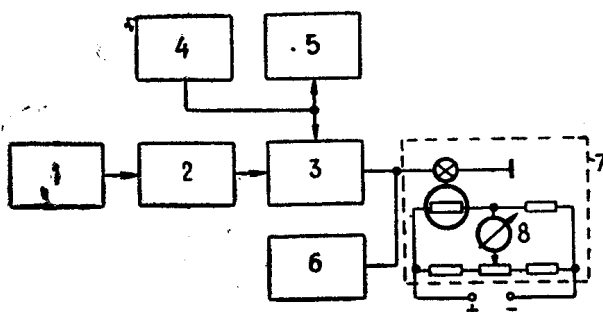


Рис. 4.

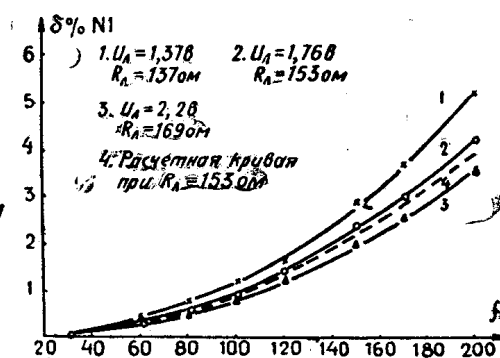


Рис. 5.

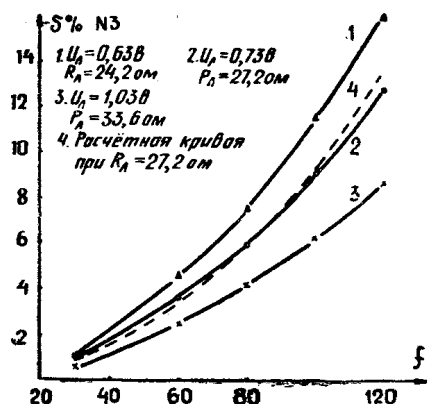


Рис. 6.

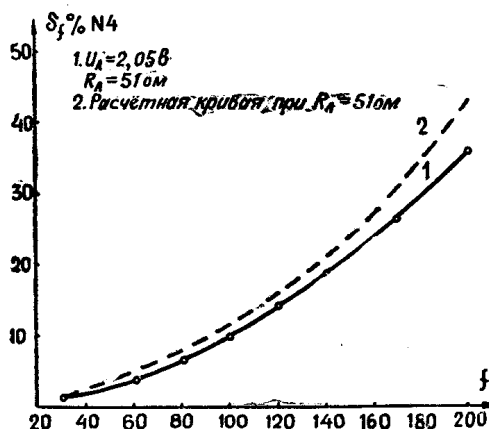


Рис. 7.

Переменное напряжение (U_f) с генератора 1 через фильтр 2 и коаксиальный переключатель 3 подавалось на фотоэлектрический компаратор 7 и образцовый вольтметр 6, по которому устанавливалась заданная величина его, затем балансировался мост компаратора с помощью индикатора 8 (чувствительность индикатора 0,01% дел). После этого

переключателем 3 вместо генератора 1 подключался источник постоянного тока 4 и величина постоянного напряжения изменялась до нулевых показаний индикатора 8. Измерение величины постоянного напряжения (U_0) осуществлялось потенциометрической установкой 5. Частотная погрешность вычислялась по формуле (1) с учетом частотной поправки вольтметра.

Результаты приведены в табл. (1, 2, 3) и графиках рис. 5, 6, 7. Сплошными линиями изображены экспериментально снятые частотные погрешности ФП при различных сопротивлениях лампочки в рабочей точке, пунктиром показан расчетный ход частотной ошибки преобразователя для одной из рабочих точек.

Т а б л и ц а 1

Опытная лампа № 1

Параметры нитки как у НСМ 6,3 x 20. Число витков

$W = 112, I_d = 10 \text{ ма}$

$f \text{ (мГц)}$	60	80	100	120	150	170	200
$U_f (\text{в})$	1,377	1,382	1,388	1,394	1,413	1,423	1,444
$U_0 (\text{в})$	1,3715	1,3715	1,3715	1,3715	1,3733	1,3733	1,3733
$-\delta_f \%$	0,366	0,73	1,17	1,643	2,9	3,65	5,2
$-\delta'_f \%$					3,12	3,95	3,63

$I_d = 11,5 \text{ ма}$

$f \text{ (мГц)}$	60	80	100	120	150	170	200
$U_f (\text{в})$	1,7670	1,7720	1,7770	1,7860	1,8010	1,8120	1,8340
$U_0 (\text{в})$	1,7606	1,7609	1,7609	1,7609	1,759	1,7599	1,7599
$-\delta_f \%$	0,36	0,64	0,92	1,43	2,44	3,0	4,2
$-\delta'_f \%$					2,64	3,3	4,62

$I_d = 13 \text{ ма}$

$f \text{ (мГц)}$	60	80	100	120	150	170	200
$U_f (\text{в})$	2,2070	2,212	2,219	2,228	2,243	2,257	2,2810
$U_0 (\text{в})$	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200	2,201	2,2020
$-\delta_f \%$	0,36	0,57	0,89	1,28	2	2,54	3,54
$-\delta'_f \%$					2,2	2,84	3,94

Расчеты производились по формулам (5, 6, 7) с учетом конструктивных размеров преобразователя (см. рис. 3).

В ы в о д ы

1. Основное влияние на погрешность компарирования фотоэлектрического преобразователя в области высоких частот оказывают реактивности элементов цепи лампы накаливания.

Таблица 2

Опытная лампа № 3

Нить прямая $d = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $l = 3,37 \text{ мм}$
 $I_{\text{л}} = 26 \text{ ма}$

$f (\text{мГц})$	60	80	100	120
$U_f (\text{в})$	0,6622	0,6821	0,7069	0,7348
$U_0 (\text{в})$	0,6332	0,6332	0,6332	0,6332
$-\delta_f \%$	4,56	7,6	11,6	16,1

 $I_{\text{л}} = 27 \text{ ма}$

$f (\text{мГц})$	60	80	100	120
$U_f (\text{в})$	0,7604	0,7781	0,8011	0,8281
$U_0 (\text{в})$	0,7338	0,7345	0,7345	0,7345
$-\delta_f \%$	3,6	5,9	9,1	12,8

 $I_{\text{л}} = 30,7 \text{ ма}$

$f (\text{мГц})$	60	80	100	120
$U_f (\text{в})$	1,061	1,079	1,100	1,127
$U_0 (\text{в})$	1,036	1,036	1,0361	1,0364
$-\delta_f \%$	2,4	4,13	6,17	8,76

Таблица 3

Опытная лампа № 4

Параметры нити у НСМ 6 x 150
 $I_{\text{л}} = 40,5 \text{ ма}$

$f (\text{мГц})$	60	80	100	120	140	170	200
$U_f (\text{в})$	2,130	2,187	2,266	2,345	2,456	2,627	2,790
$U_0 (\text{в})$	2,051	2,050	2,055	2,053	2,069	2,074	2,053
$-\delta_f \%$	3,80	6,7	10	14,2	18,7	26,6	36
$-\delta'_f \%$					18,9	27	36,4

2. Теоретически и экспериментально показано, что первичная цепь ФП может быть представлена в виде эквивалентной схемы (рис. 2) с сосредоточенными постоянными.

3. При расчетах частотной ошибки преобразователя необходимо учитывать реактивности не только нагревателя и вводных траверз, но и всех токоподводящих проводников, включенных между ЛН и точкой, в которой измеряется напряжение.

4. При коаксиальной конструкции преобразователя выбором оптимальных размеров внешнего проводника можно добиться компенсации частотной погрешности компарирования.

Авторы выражают свою признательность А. И. Лысову за помощь в разработке и изготовлении опытных образцов ламп накаливания, а также А. М. Федорову за помощь в постановке эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Перминов, М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист. Компаратор переменного тока на фотоэлектрических преобразователях. Автометрия, № 5, 1965.
 2. М. С. Ройтман, В. Ф. Аникин, Ю. М. Фомичев, В. Р. Цибульский, Э. И. Цимбалист, А. И. Крамнюк. Образцовые источники переменных напряжений. Отчет НИР «Веретено», «Витамин», инв. № 502500, № гос. рег. 68021571, 68021575, ВИНТИ, 1969.
 3. Л. А. Цейтлин. Индуктивности проводов и контуров. Госэнергоиздат, М.—Л., 1950.
 4. Н. В. Зернов и В. Г. Карпов. Теория радиотехнических цепей. Изд-во «Энергия», М.—Л., 1965.
-