

УДК 621.376.234+621.317.738+621.317 761

ИВ. А. КУРТЕВ,
ИЛ. М. ПАНАМСКИЙ, ИВ. Б. СТАНЧЕВ

(Болгария, София)

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «ЧАСТОТА — ПОСТОЯННЫЙ ТОК»
ИЛИ «ЕМКОСТЬ — ПОСТОЯННЫЙ ТОК»
С КОМПЕНСАЦИЕЙ ОШИБОК ДИОДНОГО ДЕТЕКТОРА**

Введение. Преобразователи «частота — постоянный ток» или «емкость — постоянный ток» находят широкое применение в схемах частотомеров, фарадметров, в телеизмерительных системах и пр. Как известно [1, 2], они основаны на принципе заряда и разряда конденсатора прямоугольным напряжением (рис. 1), полученным заранее формирующим устройством. Среднее значение тока через сопротивление нагрузки R_n , представляющее собой магнитоэлектрическую измерительную систему или эталонное сопротивление, определяется по закону Кулона:

$$I_0 = \frac{\Delta Q}{T} = \Delta Q f = C \Delta U f = 2UCf, \quad (1)$$

где C — емкость конденсатора; U — амплитуда прямоугольного напряжения с частотой f . Это выражение выполняется при условии законченного переходного процесса, т. е. в том случае, когда за время $T/2$ напряжение конденсатора U_C достигает амплитудного значения $+U$ или $-U$. Кроме того, мы пренебрегаем влиянием сопротивления R_n , а диоды принимаем идеальными (сопротивление в прямом направлении $R_{пр} = C^{ie}$ или $R_{пр} = 0$, а в обратном — $R_{обр} = \infty$ [3]).

В равенстве (1) ток I_0 является пропорциональным емкости, частоте и напряжению. Зависимость проста и удобна для применения. На практике, однако, диодный детектор, составленный из диодов D_1 и D_2 , обладает нелинейной характеристикой, что обуславливается переменным сопротивлением в прямом направлении и наличием обратного тока в диодах; появляются ошибки, зависящие от частоты f , емкости C и сопротивления нагрузки R_n . Шунтированного для переменных составляющих тока достаточно большой емкостью C_0 . В преобразователях высокого класса точности этими ошибками пренебрегать нельзя.

В настоящей работе предлагается схема такого преобразователя, в котором осуществляется компенсация ошибок диодного детектора.

Принцип действия и анализ схемы. Современные полупроводниковые диоды обладают большим обратным сопротивлением, а их сопротивление в прямом направлении, представляющее собой нелинейную величину, зависит как от тока в диодах, так и от температуры, причем с

уменьшением тока оно увеличивается. Кроме того, конденсатор C заряжается (разряжается) за время $T/2$ не до напряжения U , как принято в равенстве (1), а до напряжения U_C (рис. 2). Вследствие различия цепей заряда и разряда диодов их остаточные напряжения $\Delta U_C'$ и $\Delta U_C''$ не равны друг другу. Последние зависят от R_{np} (i), C , f и U , т. е. от величин, характеризующих вид функции $U_C(t)$.

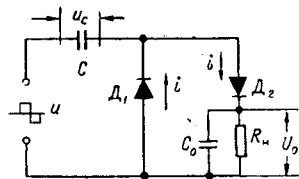


Рис. 1.

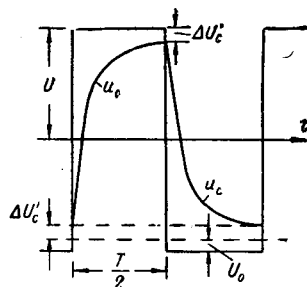


Рис. 2.

Согласно равенству (1), напряжение сопротивления нагрузки R_n равно

$$U_0 = I_0 R_n = 2U R_n C f \quad (2)$$

и участвует непосредственно в определении режима цепи. Применяя закон Кирхгофа для цепи рис. 1 и используя равенство (2), действующее значение тока через нагрузку определим из выражения

$$I_0 = [2U - I_0 R_n - \Delta U_C(C, f)] C f,$$

или

$$I_0 = \frac{2U - \Delta U_C(C, f)}{1 + R_n C f} C f, \quad (3)$$

где $\Delta U_C(C, f) = \Delta U_C' + \Delta U_C''$ — нелинейная функция, которую трудно определить математически.

На рис. 3 показана схема, в которой компенсируются ошибки $\Delta U_C(C, f)$ и U_0 диодного детектора. В каждый момент времени напряжение U_d диодного детектора подается на усилитель постоянного тока с большим входным и малым выходным сопротивлением и с коэффициентом усиления $K \leq 1$ ($K = 1 - \epsilon$). Этим требованиям удовлетворяют различные катодные или эмиттерные повторители. Выходное напряжение $K u_d$ усилителя суммируется с входными прямоугольными импульсами; при этом получается замкнутая система с положительной обратной связью, в которой не выполняется амплитудное условие для самовозбуждения.

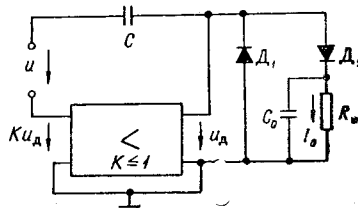


Рис. 3.

На основании общей теории электрических цепей можно показать, что ток через нагрузку R_n (см. рис. 3) определяется из выражения

$$I_0 = \frac{2U - (1 - K) \Delta U_C(C, f)}{1 + (1 - K) R_n C f} C f. \quad (4)$$

Компенсация ошибок диодного детектора зависит от степени приближения, с которой можно реализовать $K \rightarrow 1$. В идеальном случае

($K=1$) достигается полная компенсация и выражение (4) сводится к 1, т. е. осуществляется линейное преобразование. Преимущество предлагаемой схемы заключается и в том, что величина сопротивления нагрузки R_H (в известных пределах) не оказывает влияния на точность преобразователя.

Экспериментальные результаты. В целях определения ошибок преобразователя необходимо исходить из характеристики напряжение — ток полупроводниковых диодов [4]. При этом получаются сложные зависимости, которые неудобны для работы. Кроме того, характеристики отдельных диодов обычно отличаются друг от друга, поэтому предпочтительнее определять ошибки экспериментальным путем.

Для проведения экспериментальных исследований была реализована схема, доказанная на рис. 4. Блок 1 представляет собой генератор синусоидального напряжения, частота которого контролируется цифровым частотомером f . Синусоидальное напряжение преобразуется в прямоугольное блоком 2 и подается на электронный ключ T_1 . Амплитуда коммутационного напряжения стабилизируется с помощью стабилитро-

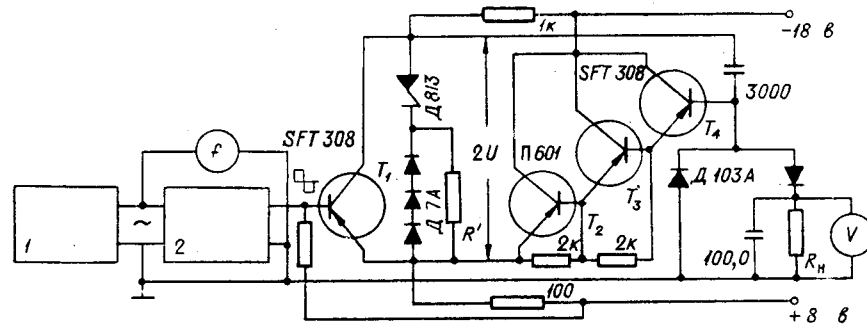


Рис. 4.

на Д813. Диоды Д7А и сопротивление R' включаются для температурной компенсации стабилитрона. Усилитель выполняется в виде составного эмиттерного повторителя (T_2, T_3, T_4) с коэффициентом усиления $K \approx 0,98$. Экспериментальные результаты даны в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения: U_0 — напряжение сопротивления R_H без компенсации ошибок, а U_0' — при наличии компенсации (включенный усилитель); U_0 — теоретическое значение, определенное из равенства (2). Напряжения U_0' и U_0'' измеряются цифровым вольтметром типа ДМ2001, кл. 0,05.

Т а б л и ц а 1

$f, \text{кГц}$	10,102	15,016	20,012	25,006	30,002	35,014	40,032	45,005	50,044
$U_0, \text{мВ}$	35,9	53,9	71,83	89,75	107,65	125,68	143,69	161,54	179,73
$U_0', \text{мВ}$	32,75	49,05	65,15	81,10	96,95	112,7	128,50	143,5	159,50
$U_0'', \text{мВ}$	35,8	53,8	71,70	89,25	107,00	124,9	142,75	160,5	178,50
$E', \%$	-1,755	-2,70	-3,72	-4,81	-5,98	-7,22	-8,46	-10,1	-11,2
$E'', \%$	-0,056	-0,056	-0,0724	-0,278	-0,384	-0,434	-0,523	-0,58	-0,63

$$2U = U_z = 11,965 \text{ в}; R_H = 100 \text{ ом (0,05\%)}; C = 300 \text{ пф (0,1\%)}; I_{\text{OH}} = 2 \text{ ма}$$

Приведенные ошибки ϵ' и ϵ'' вычисляются согласно выражениям:

$$\epsilon' = \frac{U_0' - U_0}{U_{0н}} 100; \quad \epsilon'' = \frac{U_0'' - U_0}{U_{0н}} 100,$$

для $U_{0н} = 170$ $\epsilon'' = 1000$ проявляется вследствие ограничения со стороны эмиттерного повторителя.

Таблица 2

$R_n, \text{ом}$	100	200	300	500	1000	2000	3000	4000
$U_0', \text{мв}$	195,5	175,5	155,0	148,5	141,5	124,5	111,5	101,5
$U_0'', \text{мв}$	178,5	178,5	178,5	178,0	177,5	176,5	162,5	147,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования убедительно подтверждают эффективность предложенного компенсированного преобразователя. Полученные результаты (см. табл. 1 и 2) показывают, что значительно повышается точность преобразователя и линейность шкалы, причем влияние сопротивления нагрузки уменьшается существенно. Естественно, что можно сделать ряд таких улучшений, как приближение коэффициента усиления K к единице, подбор более подходящих диодов, уменьшение тока $I_{0н}$ и др., вследствие которых погрешность преобразования может быть еще более уменьшена. Авторы без затруднений осуществили повторитель с коэффициентом усиления $K=0,997$; $R_{вх. дин} = 3 \text{ Мом}$ для частот до 100 кГц. Можно ожидать, что с помощью этого повторителя при $I_{0н} = 100 \div 200 \text{ мка}$ и детектора с диодами Д223А ошибки будут ниже 0,03%.

Предложенный преобразователь можно использовать в схемах для измерения не только f и C , но и напряжений и токов. Вместо детекторного преобразователя можно включать индикаторы электродинамической или электромагнитной системы и таким образом получать устройства с улучшенными показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ремез. Радиоизмерения. М., Связьиздат, 1960.
2. К. С. Полулях.—Электронные измерительные приборы. М., «Высшая школа», 1966.
3. А. В. Фремке. Телеизмерения. М., Госэнергоиздат, 1958.
4. И. П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., «Энергия», 1967.

Поступила в редакцию
8 октября 1968 г.