

В. А. ИВАНОВ  
 (Ленинград)

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДЕТЕКТОРОВ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СО СКОЛЬЗЯЩИМ СМЕЩЕНИЕМ

Детекторы среднеквадратичных значений со скользящим смещением обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными детекторами без скользящего смещения [1]. Они просты по конструкции, имеют большой динамический диапазон и обеспечивают высокую точность преобразования. Наличие скользящего смещения позволяет производить операцию извлечения квадратного корня без применения специальных логарифмирующих устройств [1, 2]. Достоинством этих детекторов является также и то, что количество цепочек, кусочно-линейной аппроксимации не зависит от величины динамического диапазона, а определяется величиной пикфактора измеряемых сигналов (отношением амплитудного значения к среднеквадратичному). Однако применение детекторов со скользящим смещением до сих пор ограничивается тем, что не существует метода их расчета. Предлагаемый метод расчета позволит восполнить этот пробел.

Рассмотрим типовую схему детектора среднеквадратичных значений со скользящим смещением [3] (рис. 1). В схеме использована кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики детектора.

В случае, если амплитуда входного сигнала превышает напряжение на выходе детектора  $U_0$ , то диоды  $D_2, D_3, \dots, D_n$  последовательно открываются и сопротивления  $r_2, r_3, \dots, r_n$  подключаются параллельно

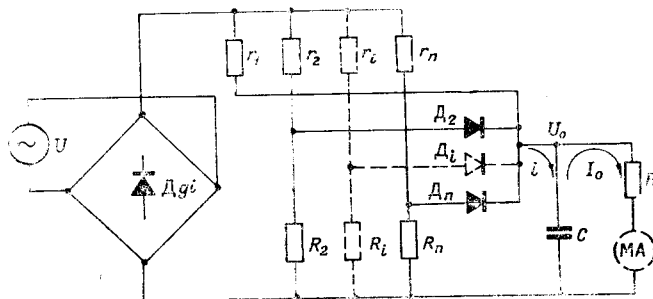


Рис. 1.

где  $\beta$  — коэффициент параболы.

На рис. 2 приведены «мгновенные» вольт-амперные характеристики детекторов при разных значениях напряжения смещения  $U_0$  на емкости  $C$  (соответствующие им идеальные квадратичные параболы показаны штриховыми линиями).

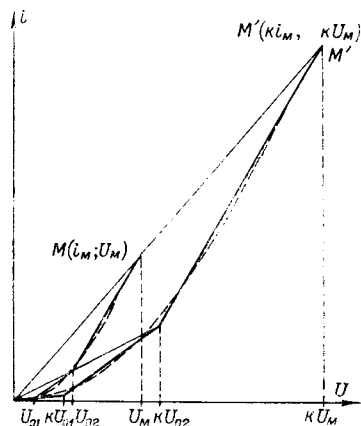


Рис. 2.

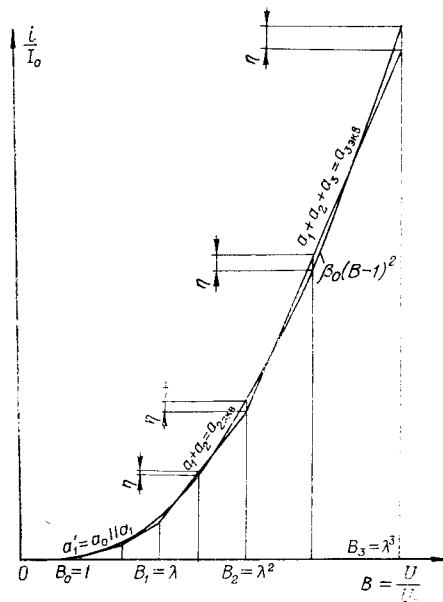


Рис. 3.

Для максимальной точки  $M$  с координатами  $i_M$  и  $U_M$ , согласно (1),

$$\beta_M \approx \frac{i_M}{U_M^2} = \frac{1}{r_M U_M}, \quad (2)$$

где  $r_M$  — сопротивление характеристики детектора в точке  $M$ . Если напряжение смещения  $U_0$  изменится в  $k$  раз, то отрезки ломаной кривой смещаются параллельно самим себе так, что точки излома перемещаются по лучам, исходящим из начала координат, а их абсциссы и ординаты тоже изменяются в  $k$  раз [4]. Коэффициент параболы (2) в этом случае принимает вид

$$\beta_{Mk} \approx \frac{k i_M}{k^2 U_M^2} = \frac{1}{k} \frac{1}{r_M U_M}.$$

Таким образом, при изменении смещения  $U_0$  на емкости  $C$  происходит обратно пропорциональное изменение коэффициента квадратичной параболы с сохранением формы кривой. Подобное изменение коэффициента квадратичной параболы эквивалентно извлечению квадратного корня из возведенного в квадрат и усредненного напряжения

входного сигнала [1]. Сопротивление детектора  $r_M$  при изменении величины входного напряжения остается постоянным, что также следует отнести к достоинству данной схемы.

При определении параметров детектора исходим из его относительной вольт-амперной характеристики (рис. 3). Такое представление характеристики детектора удобно для расчета, так как коэффициент параболы  $\beta_0$  в этом случае определяется параметрами схемы и не зависит от величины входного сигнала. При расчете аппроксимирующей цепи предполагается, что диоды  $D_2, D_3, \dots, D_n$  являются идеальными, а внутреннее сопротивление источника сигналов должно быть  $r_{ic} \ll r_1 \parallel r_2 \parallel \dots \parallel r_n$  (см. рис. 1).

Диапазон аппроксимации вольт-амперной характеристики детектора определяется величиной пикфактора измеряемых сигналов в виде

$$B_m = \frac{U_m}{U_{эф}} = \lambda^n, \quad (3)$$

где  $U_m$  и  $U_{эф} \cong U_0$  — амплитудное и среднеквадратичное значения сигнала;  $\lambda$  — интервал отношения напряжений в точках преломления;  $n$  — число ветвей аппроксимации параболы.

При выборе диапазона аппроксимации вольт-амперной характеристики детектора необходимо ориентироваться на измеряемые сигналы с наибольшей величиной пикфактора. К таким сигналам следует отнести шумовой сигнал или сигналы в виде последовательности остроконечных импульсов с большой скважностью.

Величина интервала аппроксимации может быть получена из соотношения [5]

$$\lambda = \frac{1 + \sqrt{\frac{2\eta}{1+\eta}}}{1 - \sqrt{\frac{2\eta}{1+\eta}}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — относительная точность приближения к параболе (статическая погрешность). Значение  $\eta$  может служить только в качестве предельной величины, так как не выражает истинной ожидаемой погрешности ввиду того, что практически может иметь место взаимная компенсация погрешностей [3, 5].

Из выражения (3) находим необходимое количество аппроксимирующих цепочек

$$n = \frac{\lg B_m}{\lg \lambda}. \quad (5)$$

Значение  $\lambda$  может быть выражено через параметры схемы рис. 1

$$\lambda^n = \frac{r_{n+1} + R_{n+1}}{R_{n+1}}, \quad (6)$$

где  $n=1, 2, 3, \dots$

Для удобства определения сопротивлений детектора введем понятие условной проводимости отдельных ветвей  $a_i = R/r_i$  и сегментов  $R/r_{iэ}$ , где  $r_{iэ} = r_1 \parallel r_2 \parallel \dots \parallel r_i$ . С другой стороны, используя метод, предложенный в [6], условные проводимости можно выразить через параметры вольт-амперной характеристики детектора:

$$\begin{aligned}
a_1' &= \beta_0 B_1 (1 - \eta) = \beta_0 \lambda (1 - \eta); \\
a_{2\text{ЭКВ}} &= \beta_0 (B_1 + B_2) (1 - \eta) = \beta_0 \lambda (1 + \lambda) (1 - \eta); \\
a_2 &= a_{2\text{ЭКВ}} - a_1 = \beta_0 \lambda^2 (1 - \eta); \\
a_{n\text{ЭКВ}} &= \beta_0 [B_{(n-1)} + B_n] (1 - \eta) = \beta_0 \lambda^{n-1} (1 + \lambda) (1 - \eta); \\
a_n &= a_{n\text{ЭКВ}} - a_{(n-1)\text{ЭКВ}} = \beta_0 \lambda^{n-2} (\lambda^2 - 1) (1 - \eta),
\end{aligned} \tag{7}$$

где  $\beta_0$  — коэффициент параболы, соответствующей относительной вольт-амперной характеристике детектора.

Практически проводимость  $a_1'$  будет состоять из двух параллельных проводимостей  $a_0$  и  $a_1$ , где  $a_0 = R \left| \sum_{i=1}^n r_{di} \right|$  — проводимость последовательно соединенных диодов выпрямителя, а  $a_1 = R/r_1$  — проводимость ветви детектора. Проводимость  $a_0$  теоретически трудно учесть ввиду ее нелинейности при малых уровнях сигналов. Однако известно [3, 7,], что нелинейная проводимость диодов при малых уровнях сигналов способствует уменьшению погрешности аппроксимации этого участка характеристики. Начальный участок характеристики детектора можно проецировать на квадратичность экспериментально по постоянному току, согласно схеме, предложенной в [8]. С увеличением числа включенных цепочек  $a_0 \rightarrow \infty$ ,  $a_1' \cong a_1$ . При расчете параметров схемы необходимо принимать во внимание, что в сопротивление  $R$  входит сопротивление нагрузки детектора. Если последовательно с сопротивлением  $R$  включен стрелочный прибор, то величина  $R$  определяется уровнем выходного напряжения и чувствительностью прибора.

Для повышения температурной стабильности схемы необходимо уменьшать сопротивление  $R$ . Однако при слишком малой его величине возрастает мощность, потребляемая от источника сигнала, и емкость конденсатора  $C$ .

В качестве компромисса в рассматриваемой схеме детектора, по-видимому, целесообразно использовать приборы магнитоэлектрической системы с номинальными токами 100—200 мкА.

Согласно (6) и (7), с возрастанием  $\beta_0$  увеличиваются условные проводимости ветвей  $a_i$ , что приводит к значительному уменьшению сопротивлений  $r_i$  и  $R_i$ , увеличению потребляемого тока и емкости конденсатора  $C$ , особенно при большом числе аппроксимирующих цепочек. Кроме того, при малых величинах сопротивлений  $r_i$  может иметь место искажение верхнего участка вольт-амперной характеристики детектора за счет влияния внутреннего сопротивления источника сигналов и сопротивлений диодов. С другой стороны, значительное увеличение сопротивлений  $R_i$  и  $r_i$  ( $\beta_0 \ll 1$ ) приводит к уменьшению температурной стабильности схемы и увеличению напряжений, снимаемых с источника.

Кроме погрешности аппроксимации  $\eta$ , в рассматриваемом детекторе имеет место дополнительная погрешность  $\delta_C$ , которая обусловлена пульсациями выходного напряжения. Ввиду того, что погрешность  $\delta_C$  зависит от формы измеряемого напряжения [9], целесообразно получить зависимость  $\delta_C$  от величины емкости  $C$  для наиболее неблагоприятного случая периодических сигналов с  $B_m \rightarrow \infty$  (или со скважностью  $b \rightarrow \infty$ ), когда будет иметь место наибольшая погрешность  $\delta_C$ . Исходя из известного выражения  $U_C = E \exp(-t/T)$ , разряд емкости  $C$  через сопротивление  $R_s$  в этом случае можно представить так:

$$\frac{E - U_C}{E} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{m f_{\text{н}} R_s C}\right), \tag{8}$$

где  $t = 1/mf_n$  — время разряда;  $T = R_3C$  — постоянная времени разряда;  $E$  и  $U_C$  — напряжения на емкости до и после разряда;  $m$  — параметр детектирования ( $m=1$  для одноктактного и  $m=2$  для двухтактного детектора);  $f_n$  — нижняя частота измеряемого диапазона;  $R_3$  — эквивалентное сопротивление цепи разряда.

Считая обратные сопротивления ключевых диодов  $D_2, \dots, D_n$  бесконечно большими, эквивалентное сопротивление разряда емкости  $R_3$  может быть получено в виде

$$R_3 = R \parallel [r_1 + (r_2 + R_2)] \dots \parallel (r_n + R_n). \quad (9)$$

Принимая  $U_C \simeq U_0$  и  $(E - U_0)/E = \delta_C$ , из (8) получим выражение для определения необходимой величины емкости  $C$  (с избытком)

$$C = \frac{-1}{mf_n R_3 \ln(1 - \delta_C)}, \quad (10)$$

или, разлагая  $\ln(1 - \delta_C)$  в ряд, будем иметь

$$C = \frac{1}{mf_n R_3 [\delta_C + \delta_C^2/2 + \delta_C^3/3 + \dots]} \simeq \frac{1}{mf_n R_3 \delta_C}. \quad (11)$$

Величина емкости  $C$ , определяемая выражениями (10) и (11), обеспечивает измерение периодических сигналов любой формы с заданной погрешностью  $\delta_C$ .

Из рассмотренного выше следует, что все параметры детектора среднеквадратичных значений со скользящим смещением можно достаточно просто определить, исходя из относительной точности приближения к параболе  $\eta$  и максимальной величины пикфактора измеряемых сигналов  $B_m$ .

На основании изложенного определим параметры схемы двухполярного детектора (см. рис. 1). Исходные данные:  $\eta = 0,05$ ;  $\delta_C = 0,02$ ,  $B_m = 5$ ,  $f_n = 20$  Гц. В качестве индикаторного прибора используется прибор магнитоэлектрической системы типа М-24 с током отклонения на всю шкалу  $i_m = 100$  мкА и сопротивлением  $r_{пр} = 790$  Ом. Для моста и ключей схемы целесообразно использовать германиевые диоды типа Д2Б или Д10, вольт-амперные характеристики которых имеют небольшую кривизну начального участка.

Задаемся максимальным напряжением на емкости  $C$ , равным  $U_m = 2,4$  В и величиной  $\beta_0 = 0,24$ .

Для  $\eta = 0,05$  из выражения (4) находим величину интервала аппроксимации  $\lambda = 1,89$ . Количество аппроксимирующих цепочек, согласно (5), получается равным 2,53. Выбираем  $n = 3$ . Величина сопротивления  $R$  находится в виде  $R' + r_{пр} = U_{0m}/i_m = 24$  кОм. Величина добавочного сопротивления получается равной  $R' = 23,21$  кОм. Считая  $a_0 \gg a_1$ , из выражения (7) находим  $a_1 = 0,455$ ;  $a_2 = 0,86$ ;  $a_3 = 1,18$ ;  $r = R/a_1 = 52,8$  кОм;  $r_2 = R/a_2 = 27,9$  кОм и  $r_3 = R/a_3 = 20,0$  кОм.

Из выражения (6) получим  $R_2 = r_2/(\lambda - 1) = 31,4$  кОм,  $R_3 = r_3/(\lambda^2 - 1) = 7,75$  кОм. Согласно (9),  $R_3 = R \parallel [r_1 + (r_2 + R_2)] \parallel (r_3 + R_3) = 18$  кОм

Величина емкости  $C$ , полученная из (10), равна 68,8 мкФ, а из приближенной формулы (11) равна 69,5 мкФ, т. е. разница между величинами не превышает 1,02%.

Проверка показала достаточно хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Александров, В. А. Иванов. О квазиквадратичном детектировании.— Автометрия, 1969, № 3.
2. E. Sonntag. Effektivwertmesser mit gestaffelt vorgespannten Dioden und gleitender Knickspannung.— Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 1961 R 70 № 2  
Электротехника, 1969, № 13.
7. К. Б. Карандеев. Полупроводниковые выпрямители в измерительной технике. Киев. Изд-во АН УССР, 1954.
8. У. И. Тамм, Р. Р. Харченко. Оценка погрешности детектора действующих значений со скользящим смещением от формы кривой измеряемого напряжения.— Автометрия, 1969, № 4.
9. Л. И. Волгин. К вопросу определения методической погрешности линейного детектора эффективных значений со скользящим смещением.— Изв. АН ЭССР, серия физ.-матем. и техн. наук, 1963, № 2.

*Поступила в редакцию  
11 февраля 1971 г.*

---