

О. А. АЛЕКСАНДРОВ, В. А. ИВАНОВ

(Ленинград)

О КВАЗИКВАДРАТИЧНОМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ

Для измерения шумовых сигналов и сигналов сложной формы широко используются приборы, измеряющие среднеквадратичные значения напряжений. Их показания не зависят от формы и амплитуды сигнала, а определяются его энергией, пропорциональной

$$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} , \quad (1)$$

Приборы термоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и электростатической систем, дающие непосредственный отсчет среднеквадратичных значений, не нашли широкого применения в измерительной технике ввиду их серьезных недостатков. В настоящее время для таких измерений чаще всего используются простые и надежные приборы магнитоэлектрической системы с квадратичными детекторами. В отличие от приборов с непосредственным отсчетом они допускают электрическую перегрузку, имеют малые габариты и незначительную зависимость показаний от частоты.

Из многих схем квадратичных детекторов [1, 2] наибольшее распространение получили детекторы с кусочно-линейной аппроксимацией вольт-амперной характеристики [1, 3], в частности с помощью полупроводниковых диодов [4]. Однако этим детекторам также свойственны существенные недостатки. Так, например, для обеспечения большого динамического диапазона и высокой точности измерения сигналов требуется большое количество аппроксимирующих цепочек, что приводит к температурной нестабильности их характеристик; для работы таких детекторов необходимы большие мощности сигнала; шкала индикаторного прибора получается нелинейной. Перечисленные недостатки делают нецелесообразным использование детекторов с кусочно-линейной аппроксимацией в фильтровых анализаторах спектров (спектрометрах), работающих по принципу параллельного анализа, так как в этих приборах должны одновременно работать десятки детекторов, перекрывающих динамический диапазон 40—50 дб.

В последнее время в практику измерений внедряются квазиквадратичные детекторы [5—9], которые имеют сравнительно простые схемы, перекрывают большой динамический диапазон и позволяют для определенных форм сигналов получать отсчеты, близкие к среднеквадратичным.

Для получения среднеквадратичного значения в общем случае необходимо двухполярное детектирование [8, 9], однако в случае симметричных сигналов, в том числе и шумовых сигналов с нормальным распределением или сигналов после узкополосных фильтров, могут быть использованы однополярные квазиквадратичные детекторы (рис. 1). Преимущество такого детектора перед двухполярным заключается в том, что вход и выход его имеют общую точку, которая может быть заземлена. На рис. 2 показаны вольт-амперные характеристики детектора для различных величин $a=R/r$. При $a \rightarrow \infty$ результат детектирования соответствует пиковому значению сигнала (кривая 1), при $a \rightarrow 0$ результат пропорционален среднему значению сигнала (кривая 2). При некотором промежуточном значении a характеристика детектора может приближаться к квадратичной (кривая 3). В точках А и В этой кривой вольт-амперная характеристика детектора совпадает с квадратичной параболой.

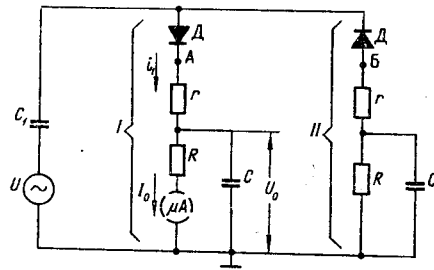


Рис. 1. Однополярный квазиквадратичный детектор.

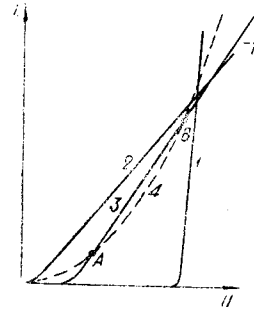


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики детекторов:

1 — пиковый детектор; 2 — детектор средних значений; 3 — квазиквадратичный детектор; 4 — детектор с квадратичной характеристикой.

Рассмотрим работу детектора (см. рис. 1) при подаче на его вход сигнала в виде последовательности прямоугольных импульсов обеих полярностей. Эффективное (среднеквадратичное) напряжение такого сигнала, определяемое по формуле (1), равно

$$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{b}} U_m, \quad (2)$$

где b — скважность импульсов; U_m — их амплитуда. Результат детектирования зависит от схемы детектора и при однополярном детектировании получается таким, как если бы на входе действовал сигнал с $U_{эф1} = U_m \sqrt{\frac{1}{b}}$. Результат двухполярного детектирования соответствует (2). Если обозначить параметр детектирования через m и придать ему значения $m=1$ для однополярного и $m=2$ для двухполярного детектора, т. е. $U_{эф m} = U_m \sqrt{\frac{m}{b}}$ то эффективное напряжение

входного сигнала, отсчитанное по результату детектирования, будет относиться к истинному его значению, как

$$\frac{U_{\text{эф}m}}{U_{\text{эф}}} = \sqrt{\frac{m}{2}}. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, ток через сопротивление r будет протекать только в том случае, если мгновенное значение входного сигнала (в данном случае его амплитуда U_m) превышает постоянное напряжение на емкости U_0 . Учитывая, что постоянная составляющая тока через емкость C не проходит и среднее значение тока r_1 в установившемся режиме равно току нагрузки I_0 , находим

$$I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{m}{T} \int_0^{\frac{T}{b}} \frac{U_m - U_0}{r} \alpha t = \frac{m}{b} \frac{U_m - U_0}{r}. \quad (4)$$

Из (2) — (4) получаем:

$$U_0 = K U_{\text{эф}}; \quad (5)$$

$$K = \sqrt{\frac{b}{2} \frac{am}{am + b}}, \quad (6)$$

где K — коэффициент передачи. Таким образом, напряжение смещения U_0 пропорционально эффективному значению измеряемого напряжения.

Из (6) имеем

$$b_{1,2} = \frac{am}{4K^2} [am - 4K^2 \pm \sqrt{am(am - 8K^2)}], \quad (7)$$

т. е. при $am > 8K$ существуют такие два значения скважности b , при которых импульсы с одинаковыми эффективными напряжениями, несмотря на разницу в их амплитудах, дадут, согласно (5), одну и ту же величину U_0 . Это обстоятельство может быть использовано для проверки приборов с детекторами со скользящим смещением, так как эффективные значения прямоугольных импульсов могут быть измерены непосредственно по их осциллограммам.

В случае других форм сигналов (например, синусоидального и шума с нормальным распределением) можно также подобрать значения a , при которых для каждой пары сигналов получаются одинаковые соотношения между напряжениями U_0 и эффективными напряжениями этих сигналов. Как будет показано ниже, определение необходимой величины a удобно производить по приводимым графикам.

На рис. 3, а прямой линией D_1 показана вольт-амперная характеристика линейного детектора, соответствующая напряжению смещения U_{01} и аппроксимирующая характеристику квадратичного детектора (кривая I), при подаче на вход последовательности прямоугольных импульсов с разными амплитудами и скважностями, но с одинаковыми эффективными напряжениями (см. заштрихованные импульсы входного напряжения в нижней части рис. 3).

Согласно (5) и (6), при правильном выборе параметра a смещение U_{01} будет пропорционально эффективному напряжению измеряемых сигналов. Диаграмма мгновенных значений тока в цепи линейного детектора показана на рис. 3, в, а диаграмма аналогичного тока детектора с аппроксимируемой квадратичной характеристикой приведена на рис. 3, б (заштрихованные части импульсов).

Если амплитуду (эффективное напряжение) импульсов входного сигнала увеличить в M раз, то, согласно (5), смещение U_{01} изменится также в M раз и станет равным U_{02} , что приведет к сдвигу вольт-амперной характеристики параллельно самой себе в положение, показанное штриховой прямой D_2 . При этом амплитуда (эффективное значение) тока в цепи детектора увеличится также в M раз (см. рис. 3, в).

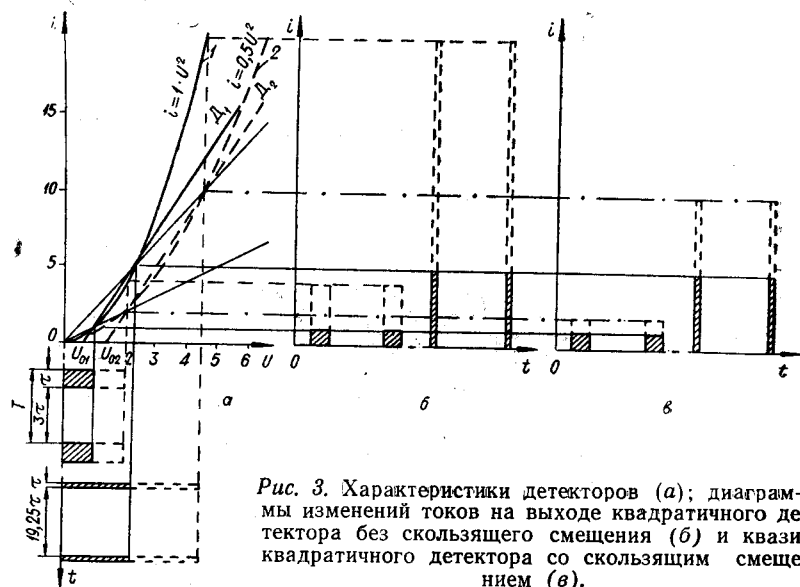


Рис. 3. Характеристики детекторов (а); диаграммы изменений токов на выходе квадратичного детектора без скользящего смещения (б) и квази-квадратичного детектора со скользящим смещением (в).

На рис. 3, б показано, как зависит величина мгновенных значений тока в цепи детектора, с квадратичной характеристикой, аппроксимируемой прямой D_1 , от изменения напряжения входного сигнала. Если напряжение смещения U_0 постоянно, то при изменении входного напряжения в M раз ток в цепи квадратичного детектора изменяется в M^2 раз. Из точки 0 (см. рис. 3, а) можно провести характеристику квадратичного детектора (штриховая кривая 2), аппроксимируемую смещенной характеристикой D_2 линейного детектора. Коэффициент параболы этой кривой оказывается в M раз меньше, чем у кривой, аппроксимируемой линией D_1 , т. е. изменился обратно пропорционально изменению напряжения смещения [10].

Таким образом, изменение напряжения смещения и соответствующий ему сдвиг аппроксимирующей детекторной характеристики, а также изменение коэффициента параболической кривой эквивалентны извлечению квадратного корня из возведенного в квадрат и усредненного напряжения входного сигнала.

Из рассмотренного следует, что квадратичное детектирование со сдвигом детекторной характеристики по оси напряжений, пропорциональным изменению эффективного напряжения входного сигнала, обладает существенным преимуществом перед другими видами квадратичного детектирования. Оно состоит в том, что динамический диапазон выходных токов равен динамическому диапазону входных напряжений; шкала стрелочного прибора, по которой отсчитываются эффективные значения, линейна; входное сопротивление детектора не зависит от эффективного значения входного напряжения.

Вид сигнала	Аналитическая зависимость между отношениями сопротивлений $a = R/r$ и напряжений $B = \frac{U_{эфф}}{U_0}$ в квадрикватичном детекторе	Примечание
Синусоидальный сигнал	$a_c = \frac{\pi}{\sqrt{m} \left(\sqrt{4B_c^2 - m} - \sqrt{m} \arccos \frac{\sqrt{m}}{2B_c} \right)}$	$B_c = \frac{U_{эфф. син}}{U_0};$ m — параметр детектирования
Шум с нормальным распределением	$a_{ш} = \frac{2\sqrt{\pi}}{2B_{ш}\sqrt{m} e^{-\frac{m}{4B_{ш}^2}} - m\sqrt{\pi} \left[1 - \Phi \left(\frac{\sqrt{m}}{2B_{ш}} \right) \right]}$	$\Phi \left(\frac{\sqrt{m}}{2B_{ш}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{m}}{2B_{ш}}} e^{-x^2} dx$ — интеграл вероятности; $B_{ш} = \frac{U_{эфф. шум}}{U_0}$
Прямоугольные импульсы	$a_{п} = \frac{b}{m \left(\sqrt{\frac{b}{m} B_{п} - 1} \right)}$	b — ширина; $B_{п} = \frac{U_{эфф. имп}}{U_0}$
Пилообразные импульсы	$a_{п} = \frac{4\sqrt{6} B_{п}}{6\sqrt{m} B_{п}^2 - 2m\sqrt{6} B_{п} + m\sqrt{m}}$	$B_{п} = \frac{U_{эфф. пил}}{U_0}$

Выбор параметров детектора. Для сигналов, приведенных в таблице, величину тока нагрузки детектора I_0 находим в виде

$$I_0 = m \int_{U_0}^{U_m} f(u) P(u) du, \quad (8)$$

где U_m — амплитудное значение сигнала (для шума $U_m \rightarrow \infty$); $f(u) = \frac{u - u_0}{r}$ — характеристика передачи детектора; $P(u)$ — плотность вероятности распределения амплитуд. Подставляя соответствующие значения плотности вероятности [3] в (8), после ряда преобразований находим зависимости между отношениями напряжений $B = U_{эф}/U_0$ и сопротивлений детектора $a = R/r$. Результаты этих преобразований сведены в таблицу.

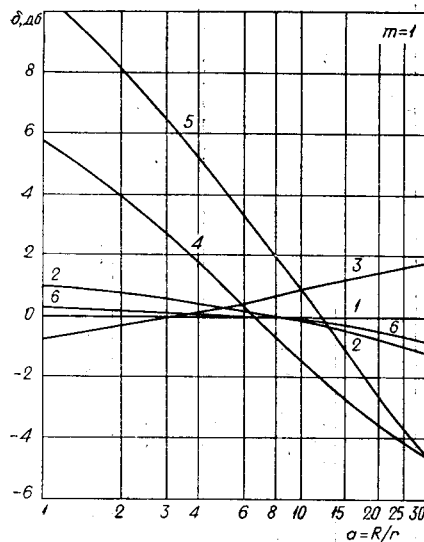


Рис. 4. Зависимость погрешности детектирования сигналов различной формы от отношения сопротивлений $R/2$ для однополярного детектора при градуировке измерительного прибора по синусоидальному сигналу:

1 — синусоидальный; 2 — шум с нормальным распределением; 3 — П-импульсы со скважностью $b=2$; 4 — П-импульсы со скважностью $b=18$; 5 — П-импульсы со скважностью $b=50$; 6 — пилообразные импульсы.

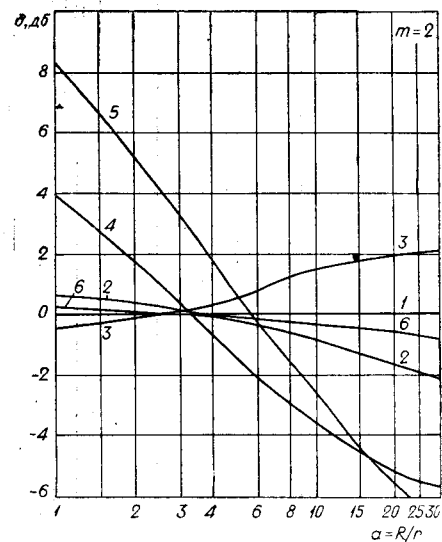


Рис. 5. Зависимость погрешности детектирования сигналов различной формы от отношения сопротивлений $R/2$ для двухполярного детектора при градуировке измерительного прибора по синусоидальному сигналу:

1 — синусоидальный; 2 — шум с нормальным распределением; 3 — П-импульсы со скважностью $b=2$; 4 — П-импульсы со скважностью $b=18$; 5 — П-импульсы со скважностью $b=50$; 6 — пилообразные импульсы.

Определить величину a можно по графикам рис. 4 (для однополярного детектора) и 5 (для двухполярного детектора), на которых показано, как зависит от a относительная систематическая погрешность δ измерения эффективных напряжений сигналов различных форм (см. таблицу) прибором с квазиквадратичным детектором, проградуированным по синусоидальному сигналу. Как видно из этих рисунков, для сигнала в виде шума с нормальным распределением нулевая погрешность полу-

чается при $a \approx 8$ для однополярного детектора и $a \approx 4$ для двухполярного детектора. Такие же отношения сопротивлений можно рекомендовать для детектирования сигналов после узкополосных фильтров. В остальных случаях желательно выбирать другие отношения сопротивлений. Например, при детектировании всех рассмотренных выше сигналов, в том числе и прямоугольных импульсов со скважностью не более 50, необходимо выбрать $a = 9,2$ для однополярного детектора и $a = 4,6$ для двухполярного. При таком выборе a погрешность детектирования не превысит $\pm 1,2$ дб. При измерении прямоугольных импульсов со скважностью не более 18 a должно быть соответственно равным 6,2 и 3,1, что обеспечит погрешность детектирования не более $\pm 0,4$ дб.

Криволинейность начального участка вольт-амперной характеристики диодов может вызвать некоторую нелинейность шкалы прибора для малых уровней сигналов. Применение германиевых диодов, например типа Д2Б или Д10, несколько уменьшает ее, однако температурная стабильность схемы ухудшается.

Если последовательно с сопротивлением r включен стрелочный прибор, то величина r определяется чувствительностью прибора. Для повышения температурной стабильности схемы величины сопротивлений r и R не должны быть очень большими. Однако при слишком малой их величине возрастают и мощность источника сигнала и емкость конденсатора C . При пользовании таблицей нужно учитывать, что в величину r входит внутреннее сопротивление источника сигнала, а в величину R — сопротивление индикаторного прибора.

Величина емкости C зависит от параметров схемы и выбирается для самой низкой частоты спектра из графиков рис. 6, заимствованных в несколько измененном виде из [11]. При правильном выборе емкости C погрешности, вносимые пульсациями напряжения в заданном диапазоне частот, могут быть пренебрежимо малыми.

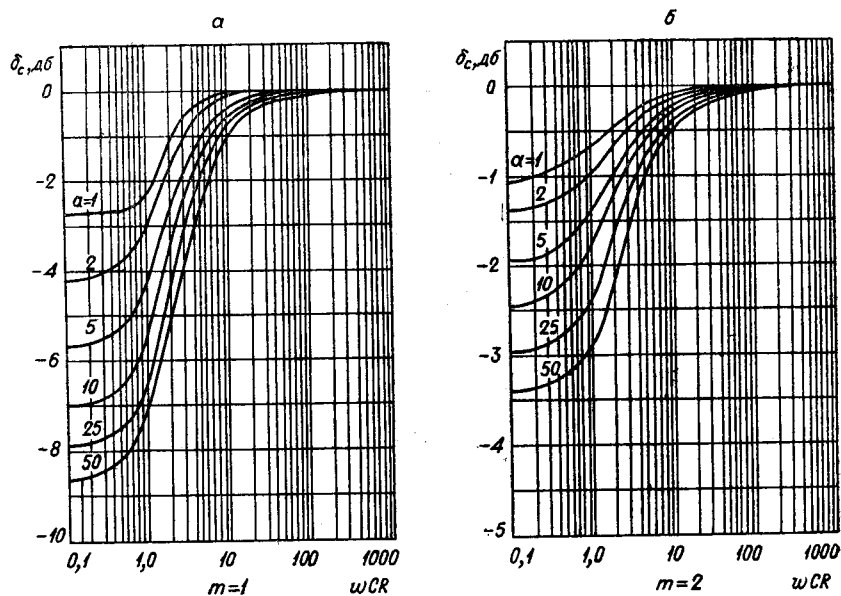


Рис. 6. Зависимость погрешности, вносимой пульсациями напряжения, от частоты:

а — при однополупериодном, б — при двухполупериодном детектировании.

З а к л ю ч е н и е

Измерение эффективных напряжений в большинстве случаев желательнее потому, что показания приборов не зависят от формы и амплитуды сигнала, а определяются его энергией.

Приборы с детекторами со скользящим смещением позволяют измерять эффективные напряжения приведенных в таблице форм сигналов с погрешностью менее $\pm 1,2$ дБ, причем отсчет производится по линейной шкале.

При измерении прямоугольных импульсов со скважностью более 50 погрешность детектирования возрастает, однако в этом случае больший интерес представляет не эффективное, а пиковое напряжение сигнала.

Для каждой пары форм сигналов может быть выбрано такое отношение сопротивлений детектора, что после градуировки измерительного прибора по одному из сигналов измерение эффективного напряжения другого сигнала может производиться без поправок.

Динамический диапазон квазиквадратичных детекторов определяется динамическим диапазоном источника сигналов и может быть сделан более 40—50 дБ.

Точность детектирования для всех форм сигналов может быть существенно повышена, если прямую вольт-амперную характеристику заменить кусочно-линейной аппроксимацией параболической кривой, коэффициент которой меняется обратно пропорционально величине скользящего смещения.

Квазиквадратичный детектор и его свойства многократно проверялись практически. Результаты проверок дали хорошее совпадение с теорией.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б. Г. Кадук и А. И. Гладский. Анализ и исследование некоторых схем квадратичных детекторов.—Измерительная техника, 1963, № 2.
2. Г. П. Шкурин. Справочник по новым радиоизмерительным приборам. М., Воениздат, 1966.
3. A. Ambrozy. Die dynamischen Fehler polygonal angenäherter quadratischer Detektoren.—Arch. für technisches Messen, 1961, № 311.
4. Б. Г. Кадук. Новый метод расчета квадратичного детектора на полупроводниковых диодах по схеме сегментно-линейной аппроксимации.—Радиоэлектронная промышленность, 1959, № 13.
5. H. Gommelich. Das Verhalten einer einfachen Gleichrichterschaltung beim Messen nichtsinusförmiger Spannungen.—Elektronische Rundschau, 1961, Bd. 15, № 4.
6. H. Boucke. Ein neuartiger Effektivwert—Gleichrichter mit verminderten Kurvenformfehler.—Arch. elektr. Übertr., 1950, Bd. 4, S. 267—270.
7. O. Schmid. Die grundlager linearer Effektivwertgleichrichter.—Arch. elektr. Übertr., 1951, Bd. 5, S. 241—247.
8. C. G. Wahrmann. A true RMS Instrument.—Brüel and Kjær Techn. Rev., 1958, № 3.
9. C. G. Wahrmann. Methods of Checking the RMS Properties of RMS Instruments.—Brüel and Kjær Techn. Rev., 1963, № 1.
10. С. А. Гинзбург. Нелинейные цепи и их функциональные характеристики. М., Госэнергоиздат, 1958.
11. Т. Мартин. Электронные цепи. М., Воениздат, 1958.

Поступила в редакцию
1 февраля 1968 г.,
окончательный вариант
29 июля 1968 г.