

Ю. Э. НИИНЕ, У. П. ТАММ

(Таллин)

## О ПОГРЕШНОСТИ КВАЗИКВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ МАЛОИСКАЖЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Общезвестен измерительный детектор, однополупериодная схема которого приведена на рис. 1. Этот детектор применяется в измерителях амплитудного и средневыпрямленного значений напряжения переменного тока. Он находит применение также и в измерителях действующего значения напряжения переменного тока, хотя и не обладает квадратичной вольт-амперной характеристикой вида  $i = Su^2$ , где  $u$  — входное напряжение детектора;  $i$  — ток на входе усредняющей цепочки (см. рис. 1);  $S$  — коэффициент пропорциональности. Ввиду отсутствия у этого детектора квадратичной вольт-амперной характеристики он и получил название «квазиквадратичный детектор» [1]. В литературе встречается также название «квазипиковый детектор» [2—4], которое нельзя считать удачным.

В предположении, что диод  $D$  является идеальным ключом, детектор (см. рис. 1) приближается к идеальному амплитудному детектору или же идеальному детектору средневыпрямленного значения по мере приближения величины отношения  $R_1/R$  соответственно к нулю или бесконечности. В измерителе действующего значения рассматриваемый детектор обеспечивает минимальную погрешность измерения при конечном ненулевом значении  $R_1/R$ . При том значении  $R_1/R$ , соответствующие минимальной погрешности, в общем случае не одинаковы для различных множеств возможных форм кривой входного напряжения детектора. Так, например, для детекторов действующего значения в спектроанализаторах акустических шумов рекомендуется выбирать  $R_1/R = 0,132$  [3], а для точного измерения действующего значения как синусоидального напряжения, так и симметричных прямоугольных импульсов со скважностью  $b = 50$  —  $R_1/R \approx 0,085$  [1].

Свойства квазиквадратичных детекторов, аналогичных представленному схемой рис. 1, рассматриваются в ряде работ [1, 3—10]. Однако ни в одной из них не ставится вопрос о том, какой должна быть выбрана величина отношения  $R_1/R$  в детекторах электронных вольтметров, отградуированных в действующих значениях чисто синусоидального напряжения, чтобы была минимальна погрешность измерения, обусловленная небольшими нелинейными искажениями измеряемого синусоидального напряжения.

В настоящей статье дан частичный ответ на этот вопрос. На рис. 2—10 приведены зависимости максимально возможного абсолютного значения погрешности  $\delta$  от коэффициента передачи  $U'_0/U$  детектора на синусоидальном входном сигнале. Здесь  $U'_0$  — выходное напряжение детектора (см. рис. 1) при синусоидальном входном напряжении;  $U$  — действующее значение входного напряжения  $u(t)$ . Последнее, как известно, определяется как

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

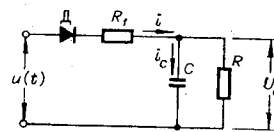


Рис. 1. Схема однополупериодного квазиквадратичного детектора.

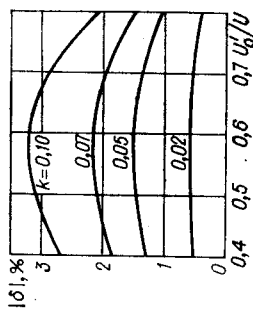


Рис. 5. Однополупериодный детектор ( $n=4$ ).

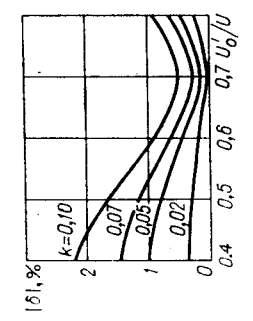


Рис. 4. Одно- и двухполупериодный детектор ( $n=3$ ).

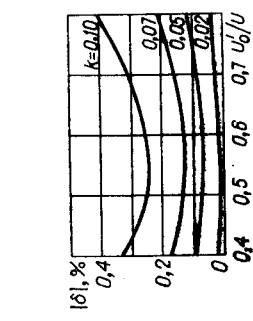


Рис. 3. Двухполупериодный детектор ( $n=2$ ).

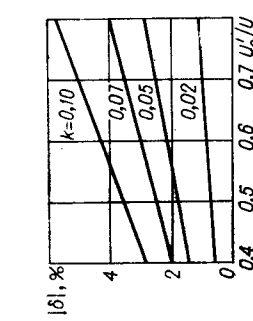


Рис. 2. Однополупериодный детектор ( $n=2$ ).

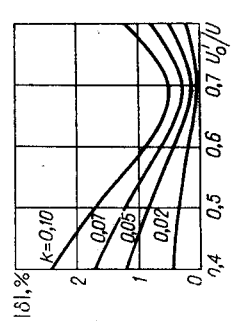


Рис. 8. Однополупериодный детектор ( $n=6$ ).

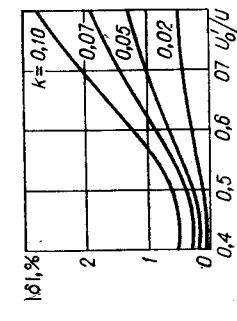


Рис. 7. Одно- и двухполупериодный детектор ( $n=5$ ).

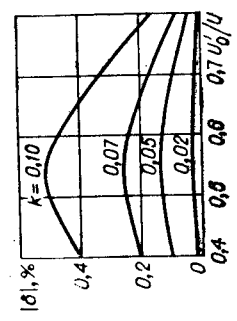


Рис. 6. Двухполупериодный детектор ( $n=4$ ).

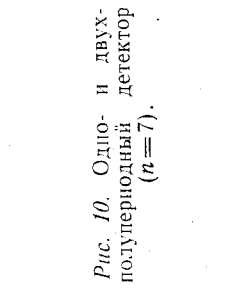


Рис. 10. Одно- и двухполупериодный детектор ( $n=7$ ).

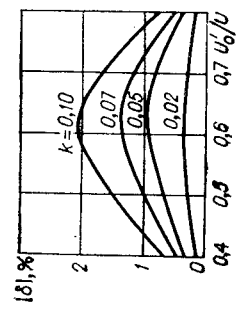


Рис. 9. Двухполупериодный детектор ( $n=6$ ).

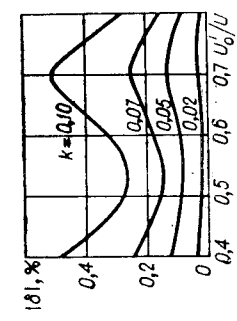


Рис. 1. Двухполупериодный детектор ( $n=4$ ).

где  $T$  — период напряжения. Значения погрешности вычислялись как

$$\delta = \frac{U_0/U - U'_0/U}{U'_0/U} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_0/U$  — коэффициент передачи детектора при входном сигнале, представляющем собой сумму основной и одной высшей гармоники, т. е. при входном сигнале вида

$$u(t) = U_{m1} \sin \omega t + U_{mn} \sin (n\omega t + \varphi_n). \quad (2)$$

Номер высшей гармоники варьировался в пределах от  $n=2$  до  $n=7$ . Отдельные кривые на каждом из рис. 2—10 соответствуют заданным значениям коэффициента гармоник  $k=U_{mn}/U_{m1}$ , равным 0,02; 0,05; 0,07 и 0,10, т. е. соответственно 2; 5; 7 и 10%. Каждая кривая представляет собой геометрическое место точек, соответствующих максимально возможному абсолютному значению погрешности  $|\delta|$  при заданном значении коэффициента гармоник и всевозможных начальных фазах высшей гармоники  $\varphi_n$ . Естественно, что при каком-нибудь конкретном значении  $\varphi_n$  погрешность  $\delta$  может быть либо положительна, либо отрицательна, либо даже равняться нулю.

Кривые рис. 2—10 получены в результате вычислений на ЭЦВМ. Погрешности рассчитаны как для одно-, так и для двухполупериодного детектора. При вычислениях предполагались идеальные ключевые свойства диодов в схеме детектора.

Характерно (см. рис. 2—10), что в случае нечетных гармоник погрешность  $\delta$  одинакова как у одно-, так и у двухполупериодного детектора. В случае же четных гармоник погрешность значительно меньше у двухполупериодного, чем у однополупериодного детектора. На основе кривых рис. 2—10 можно сделать следующие выводы.

1. Для измерения действующего значения напряжений вида (2) целесообразно в случае однополупериодного детектора выбрать значение отношения  $R_1/R$  такое, чтобы коэффициент передачи детектора при синусоидальном входном сигнале удовлетворял условию  $U'_0/U = 0,4$ . Максимальная погрешность детектора, обусловленная наличием во входном сигнале одной высшей гармоники с порядковым номером  $n=2, \dots, 7$ , может быть определена из соотношения

$$|\delta|_{\max} \leq \frac{k}{3,5} \cdot 100\%,$$

справедливого при  $k \leq 0,10$ .

2. В случаях двухполупериодного детектора при таких же ограничениях, наложенных на входное напряжение, следует обеспечить

$$U'_0/U = 0,5. \quad \text{Тогда } |\delta|_{\max} \leq \frac{k}{6} \cdot 100\%.$$

3. Когда во входном сигнале детектора вероятно наличие только третьей гармоники, целесообразно выбрать  $U'_0/U = 0,7$  (см. рис. 4).

Значение отношения  $R_1/R$ , при котором однополупериодный детектор (см. рис. 1) имеет заданное значение коэффициента передачи на синусоидальном входном напряжении  $U'_0/U$ , определяется соотношением

$$\frac{R_1}{R} = \frac{1}{\pi(U'_0/U)} \left[ \sqrt{2 - \left(\frac{U'_0}{U}\right)^2} - \frac{U'_0}{U} \left( \frac{\pi}{2} \arcsin \frac{U'_0/U}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (3)$$

где  $0 \leq U'_0/U \leq \sqrt{2}$ .

Поясним теперь кратко методику вычисления ординат точек кривых, приведенных на рис. 2—10. На ЭЦВМ вычисляются для напря-

жения вида (2) при заданных значениях  $k=U_{max}/U_{min}$ ,  $n$ ,  $\varphi_n$  и  $U_0/U$  значения функционала

$$F(x) = \frac{1}{T} \int_u^x \left( \frac{u}{U} - x \right) dt, \quad (4)$$

при значениях  $k, n$  и  $\varphi_n$  различном, значениях  $U_0/U$ , вычисляются минимальное и максимальное значения  $F(x)$ . Затем находятся уравнения двух парабол, ординаты которых при трех следующих друг за другом значениях  $x$  (т. е.  $x_{i-1}$ ,  $x_i$ ,  $x_{i+1}$ ) равны отдельно максимальным и минимальным значениям  $F(x)$ . Теперь вычисляются абсциссы точек пересечения этих двух парабол с прямой, проходящей через начало координат и точку  $(x_i, F'(x_i))$ , где  $F'(x_i)$  — значение функционала (4) при  $x=x_i$  для чисто синусоидального напряжения. Найденные абсциссы представляют собой максимально и минимально возможные значения  $U_0/U$  для (1), соответствующие заданным значениям  $U_0/U = x_i$  и  $R_1/R = F'(x_i)/x_i$  [4].

Известны различные одно- и двухполупериодные варианты схемы квазиквадратичного детектора. В связи с этим отметим здесь, что кривые рис. 2—10 справедливы для всех детекторов, для которых можно написать (непосредственно или после преобразований), как и для схемы рис. 1,

$$i_c = i - U_0/R, \quad (5)$$

для однополупериодного детектора

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } u(t) \leq U_0; \\ (u(t) - U_0)/R_{экв} & \text{при } u(t) > U_0 \end{cases} \quad (6a)$$

или же для двухполупериодного детектора

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } |u(t)| \leq U_0; \\ (|u(t)| - U_0)/2R_{экв} & \text{при } |u(t)| > U_0. \end{cases} \quad (6b)$$

При этом если  $R_1 = R_{экв}$ , то значение коэффициента передачи  $U_0/U$  (в частном случае  $U_0/U$ ) этого детектора совпадает с таковым для

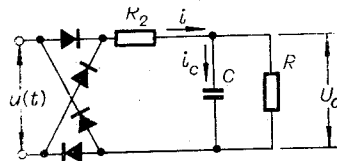


Рис. 11. Мостовая схема детектора.

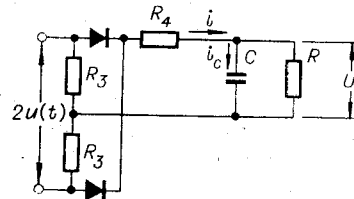


Рис. 12. Бестрансформаторная схема со средним выводом.

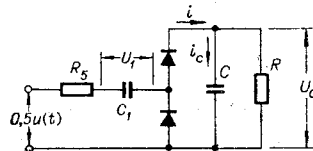


Рис. 13. Схема детектора с удвоением напряжения.

схемы рис. 1 по крайней мере при симметричных входных напряжениях одинаковой формы кривой. Здесь под симметричными подразумеваются напряжения, дифференциальная функция распределения мгновенных значений  $p(u)$  которых симметрична относительно оси ординат.

На рис. 11—13 приведены в качестве примеров некоторые распространенные варианты схемы квазиквадратичного детектора, для которых справедливы (5) и (6а) или (6б). Можно показать, что для них на рис. 11  $R_{\text{экв}} = R_2/2$ , на рис. 12  $R_{\text{экв}} = R_4/2 + R_3/4$ , на рис. 13  $R_{\text{экв}} = 2R_5$ . Схемы рис. 11 и 12 двухполупериодны, схема рис. 13 однополупериодная. В последней при симметричных входных напряжениях справедливо равенство  $U_1 = U_0/2$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Александров, В. А. Иванов. О квазиквадратичном детектировании.— *Автометрия*, 1969, № 3.
2. Применение квазипикового детектора для измерения функции плотности вероятности.— *Экспресс-информация. Радиотехника и электроника*, 1959, вып. 40, реферат РЭ-162.
3. У. П. Тамм. О целесообразности применения квазипикового детектора при 1/3-октавном и более узкополосном спектральном анализе шумов и вибраций.— *Вибрационная техника*, сб. 1. М., ДНТП, 1969.
4. У. П. Тамм. О возможности измерения действующего значения напряжения посредством простых диодных детекторов.— *Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968—1969 гг. Секция автоматки, вычислительной и измерительной техники, подсекция измерительной техники*. М., МЭИ, 1969.
5. H. Boucke. Ein neuartiger Effektivwert — Gleichrichter mit vermindertem Kurvenformfehler.— *Archiv der elektrischen Übertragung (AEU)*, 1950, Bd. 4, № 7.
6. O. Schmid. Die Grundlagen linearer Effektivwert — Gleichrichters.— *AEU*, 1951, Bd. 5, № 5.
7. O. Schmid. Zur Theorie des linearen Effektivwert — Gleichrichters.— *AEU*, 1951, Bd. 5, № 10.
8. C. G. Wahrmann. A True RMS Instrument.— *Brüel & Kjaer Technical Review*, 1958, № 3.
9. H. Gommlich. Das Verhalten einer einfachen Gleichrichterschaltung beim Messen nichtsinusförmiger Spannungen.— *Elektronische Rundschau*, 1961, Bd. 15, № 4.
10. C. G. Wahrmann. Methods of Checking the RMS Properties of RMS Instruments.— *Brüel & Kjaer Technical Review*, 1963, № 1.

*Поступила в редакцию  
19 ноября 1971 г.*

УДК 621.317.725.001.4

**А. Н. СЕМЕНОВ**  
(Новосибирск)

### РАСЧЕТ КВАЗИКВАДРАТИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Преобразователи действующего значения напряжения, построенные с использованием принципа квазиквадратичного детектирования, находят применение в системах измерения параметров энергосистем [1], анализаторах спектра [2—4] и других областях [5]. Одним из основных препятствий на пути более широкого внедрения квазиквадратичных детекторов является недостаточная разработка методики их расчета. В данной статье предлагаются и рассматриваются некоторые способы расчета квазиквадратичных детекторов.