

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ФАЗОИНДИКАТОР

М. С. РОЙТМАН, А. И. КРАМНЮК, Ю. В. ПИКАЛКИН

(Представлена научно-техническим семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Исследования фотоэлектрических преобразователей, проведенные на кафедре радиотехники, показали, что имеется реальная возможность сравнения по действующему значению двух переменных напряжений в широком диапазоне частот с погрешностью менее 0,01% [1].

Наличие прецизионных сравнивающих схем позволяет в свою очередь перейти к созданию точных фазоиндикаторов. Поскольку погрешность дифференциального указателя может быть сведена к $0,001 \div 0,003\%$, то потенциальная точность фазоиндикатора, базирующаяся на сумма-разностном методе, равна $0,0007 \div 0,002$. Практически достижимая точность ограничивается тремя факторами: погрешностью схемы образования суммы и разности двух напряжений, гармоническими составляющими и погрешностью схемы сравнения.

Настоящая работа посвящена рассмотрению указанных факторов, а также вопросам практической реализации точного фазоиндикатора 90° .

Принцип работы прибора заключается в следующем. Напряжения U' и U'' (рис. 1) через два идентичных усилителя с коэффициентом передачи подаются на схему образования суммы и разности, выполненной на трансформаторе. Напряжения, эквивалентные векторной сумме и разности входных напряжений, питают лампочки накаливания, которые освещают фотосопротивления, включенные в плечи моста. При неравенстве фазового сдвига между U' и U'' 90° освещенность фотосопротивлений различна, что приводит к разбалансу моста и фиксируется гальванометром.

Как видно из принципиальной схемы фазоиндикатора, неидентичность фазовых характеристик усилителей войдет прямой погрешностью в погрешность индикации 90° . Для уменьшения собственных фазовых искажений усилителей было принято ряд мер. Поскольку усилитель охвачен отрицательной связью ($K\beta = 30$), собственные искажения его в рабочей полосе частот малы, число элементов, вносящих фазовые искажения, сведено к минимуму и влияние нагрузки устраняется сложным повторителем. Последний позволяет уменьшить фазовые искажения, вносимые трансформатором на нижних частотах. Экспериментально снятая зависимость фазовых искажений от частоты показала, что он не превышает $0,3^\circ$ в рабочем диапазоне частот, величина же неидентичности может быть сведена к величине порядка $0,03^\circ$. При особо точных измерениях можно ввести дополнительно коррекцию фазовых сдвигов

усилителей. И так как погрешность индикации за счет неидентичности фазовых характеристик усилителей является статической, она может быть учтена при измерении.

Оценим погрешность индикации с учетом погрешности схемы образования суммы и разности и наличия гармонических составляющих во входных сигналах.

Действующее значение суммы и разности на выходе схемы определяется как

$$\begin{aligned} U' + U'' &= \sqrt{\frac{1}{T} \int [U'(t) + U''(t)]^2 dt} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[U']^2 + [U'']^2 + 2U'U'' \cos(\varphi' - \varphi'')} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U' - U'' &= \sqrt{\frac{1}{T} \int [U'(t) - U''(t)]^2 dt} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[U']^2 + [U'']^2 - 2U'U'' \cos(\varphi' - \varphi'')} \end{aligned} \quad (2)$$

В общем случае входные напряжения представляют сумму гармонических колебаний. С учетом последнего и на основании (1), (2) напряжение на выходе схемы равно

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=1}^{k=m} [(U'_k)^2 + (U''_k)^2 + 2U'_k U''_k \cos(\varphi'_k - \varphi''_k)]} - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=1}^{k=m} [(U'_k)^2 + (U''_k)^2 - 2U'_k U''_k \cos(\varphi'_k - \varphi''_k)]}. \end{aligned} \quad (3)$$

При фазовом сдвиге, близком к 90° , величина выходного напряжения и чувствительность индикатора (S) связаны соотношением

$$S = \frac{U_{\text{вых}}}{\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}}, \quad (4)$$

$$U_{\text{вых}} = S \sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}. \quad (5)$$

Так как значения входного напряжения в цепь суммирования и вычитания подаются с различными коэффициентами передачи (из-за асимметрии трансформатора), учтем этот фактор введением коэффициента асимметрии δ .

Вычислив значения корней в (3) по приближенным формулам, учитывая выражения (5) и коэффициент асимметрии, получаем

$$\begin{aligned} &[\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2} + \frac{U'_1 U''_1}{\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}} \cos(\varphi'_1 - \varphi''_1)] + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}} \sum_{k=2}^{k=m} [(U'_k)^2 + (U''_k)^2 + 2U'_k U''_k \cos \kappa(\varphi'_k - \varphi''_k)] - \\ &- (1 \pm \delta) [\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2} - \frac{U'_1 U''_1}{\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}} \cos(\varphi'_1 - \varphi''_1)] - \\ &- \frac{1 \pm \delta}{2\sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}} \sum_{k=2}^{k=m} [(U'_k)^2 + (U''_k)^2 - \\ &- 2U'_k U''_k \cos \kappa(\varphi'_k - \varphi''_k)] = U_{\text{вых}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Нас интересует величина фазового сдвига между первыми гармониками входных напряжений, т. е.

$$\varphi = \varphi_1' - \varphi_1'' \quad (7)$$

После несложных преобразований из (6) находим

$$\begin{aligned} \varphi = \arccos \left\{ \sqrt{2} S + \frac{\delta}{2U_1'U_1''} \sum_{k=1}^{k=m} [(U_k')^2 + (U_k'')^2] + \right. \\ \left. + \sum_{k=2}^{k=m} n_k' n_k'' \cos \kappa (\varphi_k' - \varphi_k'') \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $n_k' = \frac{U_k'}{U_1'}$, $n_k'' = \frac{U_k''}{U_1''}$ — соответствующие гармонические составляющие входных напряжений.

Обозначив отношение амплитуд $\frac{U_1'}{U_1''} = P$ и не учитывая во втором слагаемом высших гармоник, ввиду их малости, окончательно получаем

$$\varphi = \arccos \left[\sqrt{2} S + \frac{\delta}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) + \sum_{k=2}^{k=m} n_k' n_k'' \cos \kappa (\varphi_k' - \varphi_k'') \right]. \quad (9)$$

Соответственно отклонение от 90° составит

$$\Delta\varphi = \pm \arcsin \left[\sqrt{2} S + \frac{\delta}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) + \sum_{k=2}^{k=m} n_k' n_k'' \cos \kappa (\varphi_k' - \varphi_k'') \right]. \quad (10)$$

Дифференциальные компараторы, созданные на кафедре радиотехники, позволяют сравнивать два напряжения с точностью 0,002%. Для данного случая $S = \delta = 0,00002$.

При равенстве амплитуд входных напряжений $p = 1$. Если амплитуда 2-й и 3-й гармоник во входных напряжениях составляет соответственно 2 и 1%, то максимальная погрешность индикации составит

$$\Delta\varphi \leq 1'.$$

Проградуировав шкалу индикатора, можно регистрировать не только наличие отклонения от 90° , но также знак и величину этого отклонения.

Выводы

1. Проведенные исследования показали целесообразность применения в фазоиндикаторах фотоэлектрических преобразователей. Потенциальная точность индикации может достигать сотых долей градуса.

2. Повышение точности индикации может быть достигнуто путем повышения чувствительности указателей и создания широкополосных усилителей с малыми фазовыми искажениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Перминов, М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист. Компаратор переменного тока на фотоэлектрических преобразователях. «Автоматрия», № 5, 1965.