

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ЧЕТЫРЕХФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР

В. И. СЕДОВ, М. С. РОЙТМАН, А. И. КРАМНЮК

(Представлена научным семинаром кафедры радиотехники)

Рассмотренные в [1] методы создания двухфазных генераторов могут обеспечить дальнейшее повышение точности установки квадратуры двух напряжений в диапазоне частот только в случае применения высокостабильных и высокоточных элементов фазовращателя, а также согласующих узлов с очень малыми фазовыми сдвигами. Этот путь требует использования безреактивных высокоточных сопротивлений и конденсаторов с малыми углами потерь. Создание усилителей, фазоинверторов, трансформаторов с малыми фазовыми сдвигами в диапазоне частот наталкивается на существенные трудности. Кроме того, возникает необходимость в жесткой стабилизации рабочей частоты. Все перечисленное крайне усложняет получение квадратуры двух напряжений с погрешностью не более $0,5 \div 0,1^\circ$ в диапазоне частот $20 \text{ гц} \div \div 100 \text{ кгц}$ и приводит к резкому усложнению аппаратуры.

Эффективным способом уменьшения погрешности установки квадратуры двух напряжений является применение встроенных систем автоматической поверки (ВСАП). В этом случае требования ко всем без исключения узлам многофазного генератора резко уменьшаются, что позволяет применять детали массового производства.

Блок-схема четырехфазного генератора с применением ВСАП приведена на рис. 1. Для получения квадратуры двух напряжений используется мостиковый фазовращатель, одним из элементов которого является фотосопротивление.

ВСАП состоит из фазоиндикатора квадратуры суммо-разностного типа на фотопреобразователях [2] и УПТ. В случае отклонения фазового сдвига от 90° сумма и разность напряжений, находящихся в квадратуре, не будут равны между собой, и баланс моста нарушится. Напряжение разбаланса после соответствующего усиления в УПТ изменяет подсвет лампочки L_3 фотопреобразователя $ФП_3$, входящего в состав активного сопротивления фазовращателя, в результате чего фазовый сдвиг фазовращателя изменяется таким образом, чтобы отклонение фазового угла от 90° между выходными напряжениями генератора уменьшилось.

Определим суммарную погрешность установки квадратуры, для чего разомкнем систему автоматического регулирования в точках I—I' и зададимся произвольным значением $\frac{d\varphi}{\varphi}$ на выходе генератора,

где φ — величина отклонения фазового сдвига между выходными напряжениями от 90° .

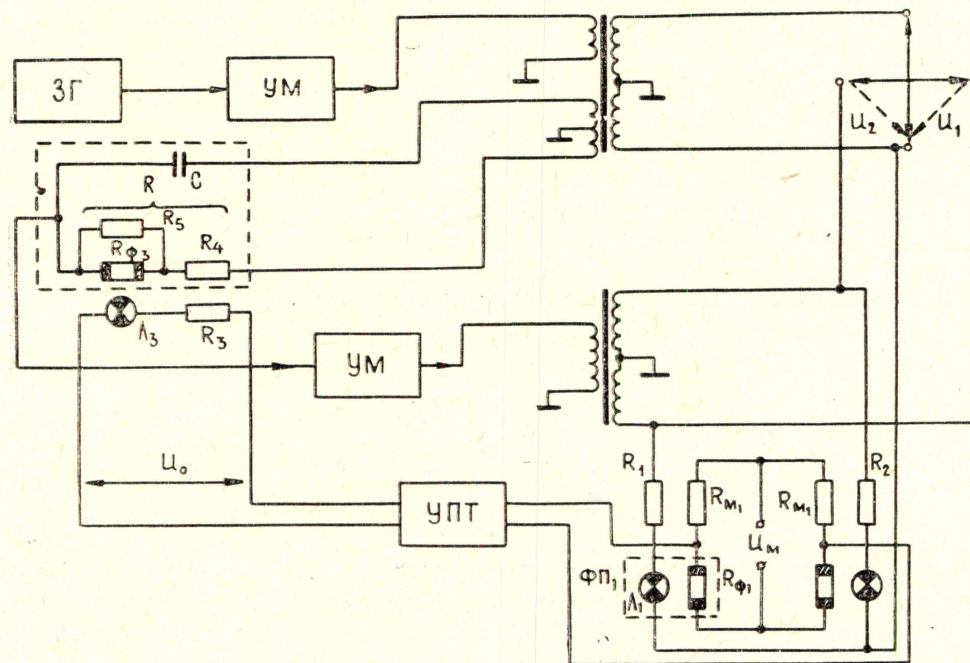


Рис. 1

В этом случае на лампочки $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ будут действовать напряжения:

$$U_1 = U \sqrt{2} \sqrt{1 + \sin \varphi} \quad \text{и} \quad U_2 = U \sqrt{2} \sqrt{1 - \sin \varphi}$$

и

$$\frac{dU_1}{U_1} = \frac{\varphi \cos \varphi}{2(1 + \sin \varphi)} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi} \quad \frac{dU_2}{U_2} = -\frac{\varphi \cos \varphi}{2(1 - \sin \varphi)} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi}. \quad (1)$$

Обходя систему по контуру, получим:

$$\frac{di_{\mathcal{L}1}}{i_{\mathcal{L}1}} = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{dU_1}{U_1}; \quad \frac{di_{\mathcal{L}2}}{i_{\mathcal{L}2}} = \frac{d_3}{d_4} \cdot \frac{dU_2}{U_2}; \quad (2)$$

$$\frac{dR_{\phi 1}}{R_{\phi 1}} = -\kappa_{i1} \frac{di_{\mathcal{L}1}}{i_{\mathcal{L}1}}; \quad \frac{dR_{\phi 2}}{R_{\phi 2}} = -\kappa_{i2} \frac{di_{\mathcal{L}2}}{i_{\mathcal{L}2}}; \quad (3)$$

$$\frac{dU_0}{U_0} = \frac{U_M}{U_0} \cdot \kappa \frac{\frac{dR_{\phi 1}}{R_{\phi 1}} - \frac{dR_{\phi 2}}{R_{\phi 2}}}{1 + \alpha}; \quad (4)$$

$$\frac{di_{\mathcal{L}3}}{i_{\mathcal{L}3}} = \frac{d_5}{d_6} \cdot \frac{dU_0}{U_0}; \quad (5)$$

$$\frac{dR_{\phi 3}}{R_{\phi 3}} = -\kappa_{i3} \frac{di_{\mathcal{L}3}}{i_{\mathcal{L}3}}; \quad (6)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d_8}{d_7} \cdot \frac{dR_{\phi 3}}{R_{\phi 3}}; \quad (7)$$

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = -\frac{3}{2} \frac{\cos^2 \varphi}{\varphi} \cdot \frac{dR}{d}. \quad (8)$$

Совместное решение (1) — (8) позволяет получить коэффициент стабилизации фазового сдвига

$$n_{\text{ст}} = \frac{3}{2} \kappa_{i1} \cdot \kappa_{i3} \frac{d_1 d_5 d_8}{d_2 d_6 d_7} \cdot \kappa \cdot \cos \varphi \frac{U_{\text{м}}}{U_0} \cdot \frac{1}{1+a}, \quad (9)$$

где

$$d_1 = 1 + \frac{R_1}{R_{\text{л1}}}; \quad d_2 = n_1 + \frac{R_1}{R_{\text{л1}}}; \quad d_3 = 1 + \frac{R_2}{R_{\text{л2}}};$$

$$d_4 = n_2 + \frac{R_2}{R_{\text{л2}}}; \quad d_5 = 1 + \frac{R_3}{R_{\text{л3}}}; \quad d_6 = n_3 + \frac{R_3}{R_{\text{л3}}};$$

$$d_7 = 1 + \frac{R_{\text{ф3}}}{R_4}; \quad d_8 = \frac{\frac{R_{\text{ф3}}}{R_5}}{1 + \frac{R_{\text{ф3}}}{R_5}};$$

$d_1 \div d_6$ — постоянные коэффициенты, характеризующие режимы работы фотопреобразователей;

d_7, d_8 — постоянные коэффициенты, характеризующие степень включения фотосопротивления $R_{\text{ф3}}$;

$\kappa_{i1}, \kappa_{i2}, \kappa_{i3}$ — относительные коэффициенты передачи по току ФП₁, ФП₂, ФП₃ соответственно;

K — коэффициент усиления УПТ.

$$a = \frac{R_{\text{ф1}}}{R_{\text{м1}}} = \frac{R_{\text{ф2}}}{R_{\text{м2}}}$$

при

$$d_1 = d_3 = d_5 = 3 \text{ и } d_2 = d_4 = d_6 = 4, \quad a = 1,$$

$$d_7 = 6, \quad d_8 = \frac{6}{7}, \quad K = 50, \quad \frac{U_{\text{м}}}{U_0} = 1, \quad \kappa_{i1} = \kappa_{i2} = \kappa_{i3} = 5,$$

$$n_{\text{ст}} = \frac{3}{2} \cdot 5 \cdot 5 \cdot \frac{3 \cdot 3 \cdot 6}{4 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} \cdot 50 \cdot 1 \cdot 0,5 = 75,$$

г. е. если погрешность квадратуры при разомкнутой системе порядка 1°, погрешность при включенной ВСАП будет порядка 0,01° ÷ 0,02°.

Сказанное справедливо при условии, если фазоиндикатор системы ВСАП не вносит заметной погрешности. Анализ возможных реализаций фазоиндикаторов [2, 3] показал, что наиболее высокая точность достигается в системах сравнения суммы и разности векторов входных напряжений по действующему значению. В этом случае основная составляющая погрешности фазоиндикатора, а именно погрешность за счет влияния высших гармонических составляющих оказывается пренебрежимо малой. Поэтому в случае использования фазоиндикаторов действующего значения погрешность установки квадратуры двух напряжений будет определяться погрешностями схем образования суммы и разности векторов напряжений и влиянием разброса входных сопротивлений индикатора.

Эквивалентная электрическая схема цепи, образующей сумму и разность напряжений, представлена на рис. 2. На этой схеме $E_1, E_2, E_3, E_4, r_1, r_2, r_3, r_4$ — выходные напряжения и выходные сопротивления каждого выхода четырехфазного генератора; R_1 и R_2 — сопротивления лам-

почек фотопреобразователей фазоиндикатора; R_3 и R_4 — сопротивления их эквивалентов.

Погрешность индикации квадратуры двух напряжений, например, E_1 и E_2 , будет равна

$$\varphi = \frac{\delta}{25(2+m)} + \frac{\delta_i}{50(4+m)} + \frac{\delta \cdot K}{2500(2+m)} + \frac{\delta_i \cdot K}{5000(4+m)} + \frac{\alpha_1}{4+m} + \frac{\alpha_2}{2},$$

где δ — разброс сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , в %;

δ_i — разброс сопротивлений r_1, r_2, r_3, r_4 , в %;

K — отклонение амплитуд напряжений одного канала (E_1 и E_3) относительно амплитуд напряжений другого канала (E_2, E_4), в %;

α_1 — фазовая погрешность трансформатора первого канала (между E_1 и E_3), в радианах;

α_2 — фазовая погрешность трансформатора второго канала (между E_2 и E_4), в радианах.

$$m = \frac{R}{r}.$$

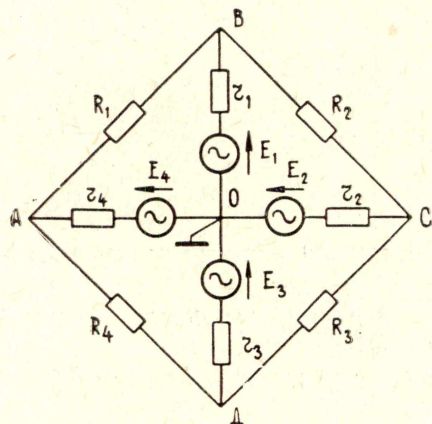


Рис. 2

Рассмотрим основные составляющие погрешности индикации квадратуры двух напряжений (при $R = 470$ ом, $r = 14,36$ ом).

1. Погрешность за счет разброса входных сопротивлений фазоиндикатора

$$\varphi_R = \frac{\delta}{25(2+m)}, \text{ где } \delta = \frac{\Delta}{R} \cdot 100\%.$$

Разброс элементов R_1, R_2, R_3, R_4 в данном случае связан с различием статического и динамического сопротивлений лампочки накаливания.

Как известно [4], статическое сопротивление цепи из линейного сопротивления и лампочки при неизменной амплитуде тока определяется как

$$R_{ст} = R_{доп} + R_{л},$$

динамическое сопротивление

$$R_{дин} = R_{доп} + nR_{л},$$

где n — показатель нелинейности вольтамперной характеристики лампочки накаливания.

Эквиваленты R_3 и R_4 могут быть с достаточно большой степенью точности подобраны равными $R_{ст}$, поэтому

$$\delta = \frac{\Delta}{R} \cdot 100\% = \frac{R_{дин} - R_{ст}}{R_{ст}} \cdot 100\% = \frac{n-1}{d_1} \cdot 100\%.$$

Обычно $d_1 \approx 3$, $n = 2$. Поэтому

$$\delta \approx \frac{n-1}{d_1} \cdot 100\% = 33\%$$

и

$$\varphi_R = \frac{\delta}{25(2+m)} = \frac{33}{25 \cdot 34,7} = 0,04^{\text{рад}} \approx 2,3^{\circ}.$$

2. Погрешность за счет разброса выходных сопротивлений каждой фазы генератора.

Указанный разброс определяется неидентичностью половин вторичных обмоток трансформатора и не превышает 1%.

Поэтому

$$\varphi_r = \frac{\delta_i}{50(4+m)} = \frac{1}{5 \cdot 36,7} = 5,4 \cdot 10^{-4} = 0,03^{\circ}.$$

3. Погрешность за счет амплитудной асимметрии каналов

$$\varphi_K = \frac{K}{100} (\varphi_R + \varphi_r)$$

при наличии периодической калибровки амплитуд каналов может быть сведена к значению меньше $0,01^{\circ}$.

4. Погрешность за счет фазовой асимметрии половин вторичной обмотки выходных трансформаторов

$$\varphi_a = \frac{\alpha_1}{4+m} + \frac{\alpha_2}{2}.$$

Без большой ошибки можно считать, что

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha,$$

тогда

$$\varphi_a = \frac{6+m}{2(4+m)} \alpha \approx 0,52\alpha.$$

Как показывают проведенные эксперименты, для широкополосных трансформаторов α может достигать нескольких градусов. Итак, основными составляющими погрешности индикации квадратуры двух напряжений в генераторе по схеме рис. 1 являются погрешности фазоинверсии трансформаторных схем и погрешности из-за влияния разброса входных сопротивлений фазоиндикатора.

Фазовая погрешность трансформаторной фазоинверсной схемы определяется в основном паразитными параметрами, которые имеют очень большие значения, особенно у трансформаторов, предназначенных для работы в широком диапазоне частот. Эту погрешность можно значительно уменьшить, применяя корректирующие RC-цепи. Подобная корреляция имеет место при подобранных R и C только на одной частоте.

В последнее время появились новые схемные решения, позволяющие резко уменьшить погрешность любых фазоинверсных схем, в основе работы которых лежит принцип автокомпенсации погрешности 5. Работу последних можно пояснить блок-схемой рис. 3, а и векторной диаграммой рис. 3, б.

Выходные напряжения любой фазоинверсной схемы отличаются друг от друга как по модулю, так и по фазе. Если между выходами

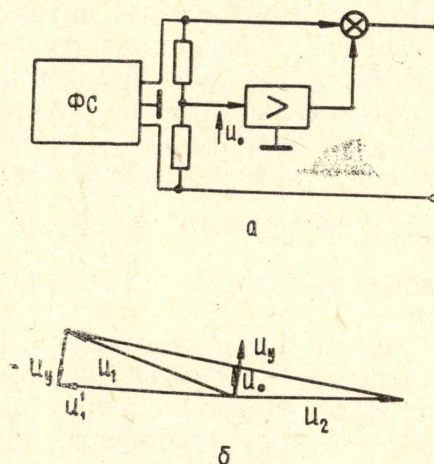


Рис. 3

схемы включить прецизионный делитель на 2, то значение напряжения U_0 между средней точкой делителя и землей будет нести в себе информацию об асимметрии напряжений как по модулю, так и по фазе. Усилив напряжение U_0 в два раза и сложив его с любым из выходных напряжений (U_1), на выходе устройства мы получим теперь два равных противофазных напряжения U_1' и U_2 .

В случае идеальных делителя и усилителя погрешность такого фазоинверсного устройства будет равна нулю. Практически как коэффициент усиления усилителя, так и коэффициент деления делителя будут комплексными величинами. Нетрудно показать, что в этом случае погрешность такого фазоинверсного устройства будет равна по модулю

$$\delta_{\text{эКВ}} = \delta_1 \delta_2 + \varphi \cdot \varphi_{\Sigma}$$

и по фазе

$$\varphi_{\text{эКВ}} = \delta_2 \varphi - \delta_1 \varphi_{\Sigma},$$

где $\delta_{\text{эКВ}}, \varphi_{\text{эКВ}}$ — асимметрия по модулю и фазе напряжений фазоинверсного устройства;

δ_1, φ — асимметрия по модулю и фазе напряжений фазоинверсной схемы;

$$\delta_2 = 1 - \frac{K_y K_c}{K_d};$$

K_d, K_y, K_c — модули коэффициентов передач делителя, усилителя и сумматора;

$\varphi_{\Sigma} = \varphi_d + \varphi_y + \varphi_c$ — суммарный фазовый сдвиг делителя, усилителя и сумматора.

Поскольку погрешности делителя и сумматора значительно меньше погрешностей усилителя, качеством последнего полностью определяется результирующая погрешность устройства.

Как следует из приведенных формул, фазовая погрешность фазоинверсного устройства сильно зависит от асимметрии по модулю и при больших значениях последней может полностью определяться ею. Но так как в устройствах подобного типа уменьшается как асимметрия по модулю, так и по фазе, фазовая асимметрия (погрешность) уменьшается значительно сильнее модульной.

На рис. 4 приведена зависимость фазового сдвига трансформатора от частоты без компенсации и с компенсацией фазовой погрешности.

Уменьшение второй составляющей погрешности установки квадратуры двух напряжений, а именно погрешности за счет разброса входных сопротивлений фазоиндикатора может быть достигнуто увеличением отношения $m = \frac{R}{r}$, где R — значение входного сопротивления фазоиндикатора, а r — выходное сопротивление каждой фазы генератора.

Увеличение m возможно как в результате увеличения R , так и уменьшения r . Уменьшение выходного сопротивления каждой фазы генератора можно получить включением усилителей мощности после выходного трансформатора, что резко увеличивает сложность генератора и позволяет уменьшить r примерно на порядок.

Стремление увеличить m за счет увеличения R приводит нас к двум вариантам. Первый из них состоит во включении между выходами четырехфазного генератора и фазоиндикатором согласующих звеньев с высоким входным сопротивлением. Этот вариант также усложняет схему, причем к согласующим звеньям предъявляются очень высокие требования в части идентичности их по коэффициенту передачи и

входному сопротивлению. Данный вариант достаточно подробно рассмотрен в [3].

Другой путь увеличения t заключается в применении схем фазоиндикаторов, обладающих высокими входными сопротивлениями.

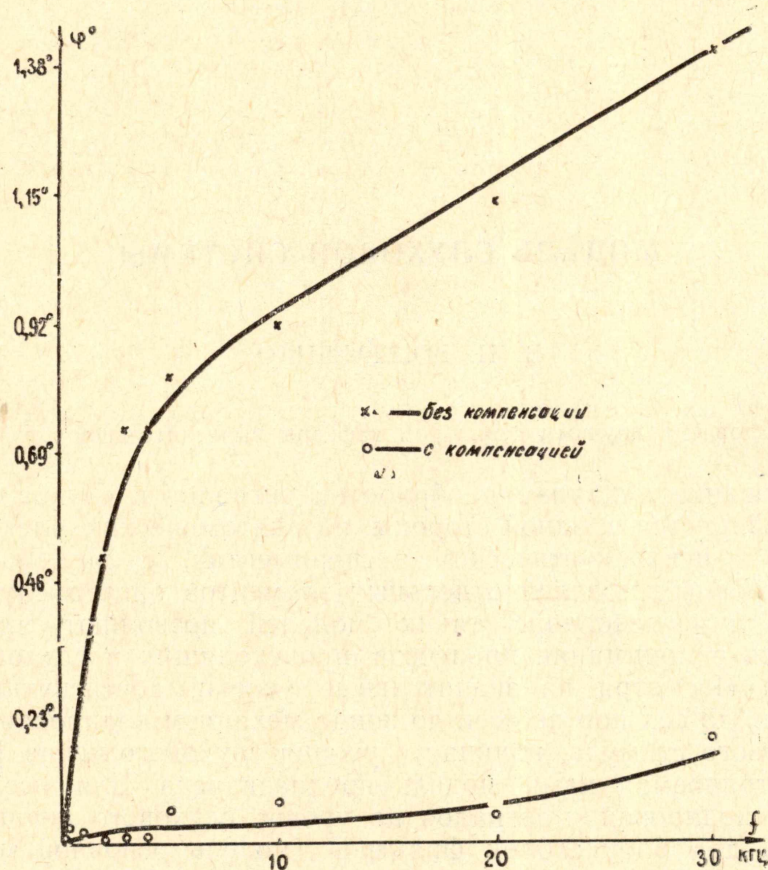


Рис. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Д. Колтик. Измерительные двухфазные генераторы переменного тока. Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР. М., 1963.
2. М. С. Ройтман. О фазоиндикаторах, базирующихся на сравнении действующих величин напряжений. Автоматический контроль и методы электрических измерений. Труды III конференции. Т. I, Новосибирск, 1961.
3. М. С. Ройтман, В. И. Седов, А. И. Крамнюк, В. М. Сергеев. Изыскание путей и методов создания универсальной поверочной установки. Отчет по н/и теме. Томск, ТПИ, 1970.
4. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, А. И. Лысов. Фотоэлектрический преобразователь как управляемый элемент электрической цепи. — Известия вузов. Приборостроение. Том IX. № 6, Л., 1966.