

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.3.084.2

С. А. КРАВЧЕНКО, Ю. В. ШЕВКОЛОВИЧ

(Москва)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ ФАЗЫ НА ПОВЫШЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

Снижение погрешностей двухфазных генераторов (образцовых мер фазового сдвига), применяемых для оценки точности фазометрических систем и основанных на сравнении частот когерентных колебаний, обусловило необходимость значительного повышения частоты их задающих генераторов. Согласно [1, 2], частота сигнала постоянного гетеродина составляет 200 кГц. Для снижения фазовых погрешностей двухфазных генераторов до $0,02^\circ$ частота сигнала, поступающего на фазоиндикатор, должна быть не менее 9 МГц. Дальнейшее повышение точности отсчета фазовых углов между выходными сигналами высокочастотных двухфазных генераторов может быть обеспечено увеличением точности круговых фазовращателей, однако известно, что точность последних падает с увеличением частоты. Таким образом, возникает противоречие между возможностью и необходимостью иметь высокую точность задаваемого фазового сдвига на высокой частоте.

В настоящей работе рассматривается двухканальный преобразователь частоты с кварцевыми фильтрами, применение которого в канале гетеродина фиксированной частоты двухфазного генератора на порядок снижает его фазовые погрешности [3]. Особенностью схемы является использование фазовращателей при достаточно низкой частоте (20 кГц), которая затем трансформируется до 200 кГц и выделяется кварцевыми фильтрами. Снижение фазовых погрешностей до $0,03^\circ$ обеспечивается за счет сравнения на фазоиндикаторе двух сигналов 20 кГц и 3,6 МГц.

Принципиальная схема. На рис. 1 показана принципиальная схема двухканального преобразователя частоты. Напряжение с частотой 3,6 МГц от кварцевого генератора КГ поступает на делитель частоты ДЧ₁ с коэффициентом деления 20 и дополнительный фазовращатель ДФ.

С выхода ДЧ₁ сигнал с частотой 180 кГц подводится к делителю частоты ДЧ₂ с коэффициентом деления 9 и к общим входам смесителей С₁—С₂. Напряжение с частотой 20 кГц с выхода ДЧ₂ подается на входные зажимы фазовращателей — градуированного ГФ (в канале «переменной фазы») и вспомогательного ВФ (в канале «опорной фазы»). С выходов фазовращателей напряжения синусоидальной формы поступают на смесители С₁—С₂, в которых смешиваются сигналы фазовращателей (частота 20 кГц) и когерентный сигнал с частотой 180 кГц. Отфильтровывание сигналов с частотой 200 кГц осуществляется кварцевыми

ми фильтрами $KФ_1—KФ_2$. С кварцевых фильтров сигналы U_1 и U_2 через выходные усилители $ВУ_1—ВУ_2$ поступают на смесители двухфазного генератора. Для контроля параметров выходных напряжений фазовращателей U_1 и U_2 в схеме предусмотрены дополнительные выходы.

Фазовые сдвиги при частотах 20 и 200 кГц устанавливаются фазовращателем ГФ. Измерение их осуществляется одноканальным фазоизмерительным устройством — индикатором на электронно-лучевой трубке (ЭЛИ). К ЭЛИ с одной стороны подводятся сигналы с выхода переключателя П от фазовращателей с частотой кварцевого генератора 3,6 МГц.

Отсчет фазовых углов производится следующим образом. Фазовращатель ГФ устанавливается в нулевое положение. Переключатель П переводят в положение а и регулировкой дополнительного фазовращателя ДФ устанавливают синфазность (совмещение) ветвей многократной фигуры (180:1) Лиссажу на экране ЭЛИ, образованной напряжением ГФ и КГ.

Затем переключатель П переводят в положение б. Если нулевой фазовый сдвиг был установлен точно, то на экране ЭЛИ будет просматриваться такая же картина фигуры Лиссажу, как и в исходном положении а переключателя П. Если этого не наблюдается, то необходимо произвести подрегулировку вспомогательного фазовращателя ВФ до совмещения ветвей фигуры Лиссажу.

Отсчет приращений фазовых углов в пределах $0—360^\circ$ осуществляется в моменты совпадения ветвей фигуры Лиссажу через 180° , где n — отношение частот сигналов, поступающих на ЭЛИ. В рассматриваемом случае дискретность отсчета составляет 1° . Погрешность отсчета фазовых углов, согласно [4], составляет $0,01—0,02^\circ$. Определение дробных значений фазовых углов может быть произведено путем интерполяции или считыванием их значений с нанесенной на среднюю часть экрана ЭЛИ шкалы.

Процедура отсчета фазовых углов с помощью фигур Лиссажу достаточно трудоемка и необходима лишь при проверке высокой точности. Для проверки фазометров низкой и средней точности до $2—3^\circ$ значения фазовых углов могут быть получены по шкале градуированного фазовращателя ГФ. Линейность шкалы последнего периодически (1 раз в 10 дней) оценивается по фигурам Лиссажу.

Анализ погрешностей. Оценка фазовых погрешностей при индикации приращений фазовых сдвигов с помощью индикатора на электронно-лучевой трубке произведена в [1, 2, 4]. Поэтому рассмотрим погрешности, обусловленные наличием в схеме градуированного фазовращателя и кварцевых фильтров.

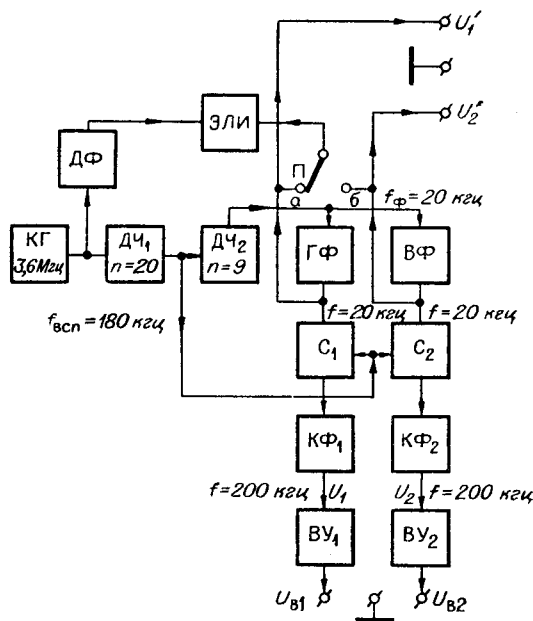


Рис. 1. Блок-схема датчика фазы на повышенные частоты (200 кГц).

Известно, что фаза выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ фазовращателя примерно равна механическому углу Θ поворота роторной обмотки относительно одной из статорных обмоток (рис. 2, а).

Рассмотрим, какой характер будут иметь фазовая и амплитудная погрешности индуктивного фазовращателя при неортогональности составляющих двухфазного напряжения. Считаем, что $I_{m_1} = I_{m_2} = I_m$;

$$i_1 = I_m \sin \omega t; \quad i_2 = I_m \sin (\omega t + \varphi); \quad (1)$$

где $\varphi = \frac{\pi}{2} + \gamma$ — фазовый сдвиг между токами катушек; причем γ — ошибка ортогональности.

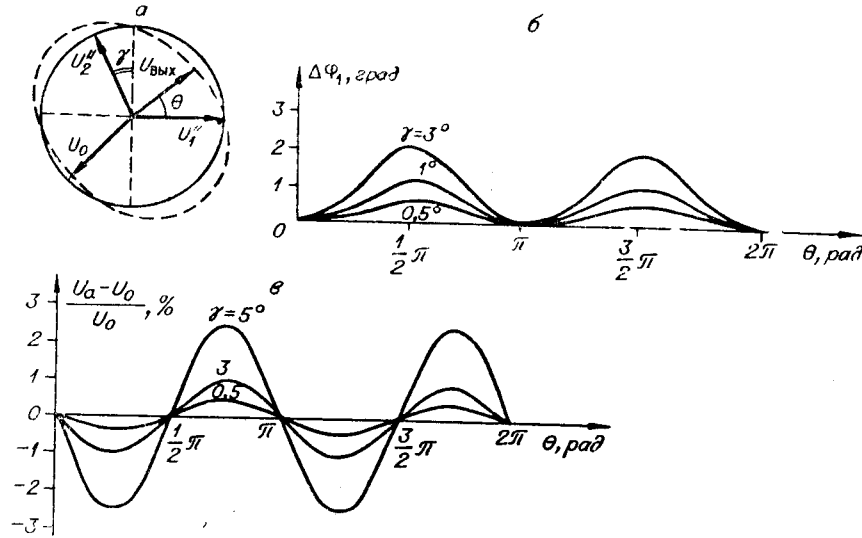


Рис. 2. Влияние отсутствия квадратуры двухфазного напряжения: а — векторная диаграмма; б — погрешности фазового сдвига; в — амплитудная.

После несложных преобразований получим выражение для выходного сигнала

$$U_{\text{вых}} = U_a \cos (\omega t + \Theta + \Delta \varphi_1). \quad (2)$$

где

$$U_a = U_0 \sqrt{1 + \sin 2 \Theta \cos \varphi}; \quad (3)$$

U_a — амплитуда выходного сигнала; U_0 — выходное напряжение при отсутствии погрешности; Θ — угол сдвига ротора:

$$\Theta + \Delta \varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \Theta \sin \varphi}{\cos \Theta + \sin \Theta \cos \varphi} \quad (4)$$

— фазовый сдвиг напряжения U_a ; $\Delta \varphi_1$ — погрешность сдвига. Выражая угол φ через $\frac{\pi}{2}$ и ошибку ортогональности через γ , найдем амплитуду

$$U_a = U_0 \sqrt{1 - \sin 2 \Theta \sin \gamma} \quad (5)$$

и погрешность фазового сдвига

$$\Delta \varphi_1 = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \Theta \frac{\cos \gamma + \operatorname{tg} \Theta \sin \gamma - 1}{1 + \operatorname{tg}^2 \Theta \cos \gamma - \operatorname{tg} \Theta \sin \gamma} \right]. \quad (6)$$

На практике величина γ обычно мала, порядка $0,5-1^\circ$. В этом случае

$$\Delta \varphi_1 \cong \operatorname{arctg} (\gamma \sin^2 \Theta); \quad (7)$$

$$U_a \cong U_0 \sqrt{1 - \gamma \sin 2\Theta}. \quad (8)$$

Максимальное значение $\Delta \varphi_1$ имеет место при $\Theta = \frac{\pi}{2}$; амплитудная погрешность равна максимуму при $\Theta = \frac{\pi}{4}$.

Практически амплитудную погрешность удобно вычислить в процентном отношении к номинальному значению, т. е.

$$\frac{U_a - U_0}{U_0} = (\sqrt{1 - \gamma \sin 2\Theta} - 1) \cdot 100\%. \quad (9)$$

Из приведенного анализа следует, что фазовая погрешность фазовращателя, обусловленная неортогональностью, имеет один знак и период повторения, равный π , в то время как амплитудная ошибка знакопеременная и имеет период повторения $\frac{\pi}{2}$ (см. рис. 2, б, в).

Неравенство амплитуд расщепленных векторов двухфазного напряжения также служит причиной фазовых и амплитудных погрешностей (рис. 3, а). Для простоты анализа положим, что векторы двухфазного

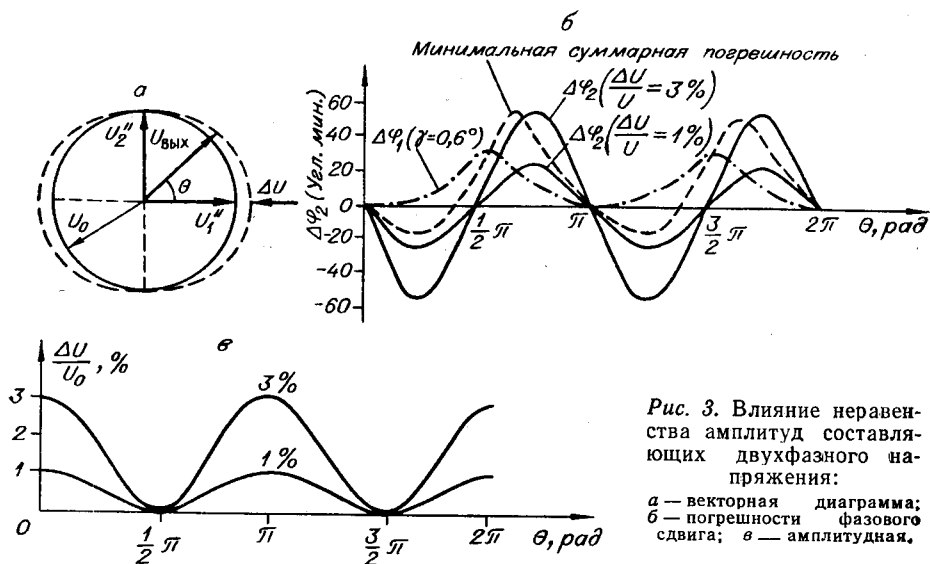


Рис. 3. Влияние неравенства амплитуд составляющих двухфазного напряжения:

а — векторная диаграмма;
б — погрешности фазового сдвига; в — амплитудная.

напряжения абсолютно ортогональны и один из них имеет некоторое приращение ΔU , т. е. $U_1 = U_0 + \Delta U$ [5]. Тогда выходное напряжение будет иметь вид

$$U_{\text{вых}} = U_a \cos(\omega t + \Theta + \Delta \varphi_2), \quad (10)$$

где

$$U_a = U_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta U^2}{U_0^2} + 2 \frac{\Delta U}{U_0} \right) \cos^2 \Theta}. \quad (11)$$

Погрешность фазовращателя в данном случае определяем как

$$\Delta \varphi_2 = - \operatorname{arctg} \left[\frac{\Delta U}{U_0} \frac{\operatorname{tg} \theta}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta + \frac{\Delta U}{U_0}} \right]. \quad (12)$$

Амплитудную погрешность фазовращателя выразим так:

$$\frac{U_a - U_0}{U_0} = \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta U^2}{U_0^2} + 2 \frac{\Delta U}{U_0} \right) \cos^2 \theta} - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (13)$$

обычно определяется приборами класса 1,5—2%, т. е. при малых значениях ΔU можно принять:

$$\Delta \varphi_2 = - \operatorname{arctg} \left[\frac{\Delta U}{2 U_0} \sin 2 \theta \right]; \quad (14)$$

$$\frac{U_a - U_0}{U_0} \approx \left(\sqrt{1 + 2 \frac{\Delta U}{U_0} \cos^2 \theta} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (15)$$

Как видно из (14), погрешность $\Delta \varphi_2$, обусловленная неравенством составляющих двухфазного напряжения, знакопеременная с периодом повторения $\frac{\pi}{2}$ и имеет максимальное значение при $\theta = \frac{\pi}{4}$ (см. рис. 3, б).

Амплитудная погрешность в этом случае имеет один знак с периодом повторения π и максимальное значение при $\theta = \pi$ (см. рис. 3, в).

Из приведенного анализа видно, что следует устанавливать квадратуру с погрешностью возможно меньшей, однако практически это осуществимо с точностью 0,5—0,6°, вследствие чего колебания напряжения на выходе могут достигать 0,5—0,8% при погрешности по фазе 27—85'.

Равенство амплитуд U_1 и U_2 можно установить с погрешностью 1%, что увеличивает погрешность по фазе на 20' (до 47—55').

Таким образом, для проверки фазометров звуковых частот, имеющих погрешности 2,5—3°, можно использовать фазовращатель ГФ с его градуированной шкалой. Для проверки образцовой фазометрической аппаратуры необходимо пользоваться электроннолучевым индикатором ЭЛИ, работающим с многократными фигурами Лиссажу. При этом погрешность фазового сдвига может быть уменьшена до 0,02—0,03° при шаге в 1° [4].

Рассмотрим дополнительные погрешности, возникающие при «переносе» низкочастотных (20 кГц) фазовых соотношений на повышенную частоту (200 кГц). Известно, что наибольшие погрешности по фазе вносят устройства с крутыми фазочастотными характеристиками, которыми являются кварцевые фильтры.

На рис. 4 показаны кривые избирательности двух кварцевых фильтров, снятые экспериментально при частоте 200 кГц и расстройке ± 5 кГц. Добротность кварцевого фильтра может быть определена из соотношения

$$Q = \frac{f_p}{2 \Delta f}, \quad (16)$$

где f_p — резонансная частота; $2\Delta f$ — полоса пропускания на уровне 3 дБ. При $\Delta f = 200$ гц $Q = 500$.

Фазочастотная характеристика кварцевого фильтра может быть получена из следующего соотношения:

$$\varphi = \operatorname{arctg} yQ, \quad (17)$$

где $y = \frac{f - f_p}{f_p}$ — величина относительной расстройки между резонансной частотой контура f_p и частотой сигнала f .

На рис. 5, а приведена фазочастотная характеристика, построенная в соответствии с выражением (17). Фазовый сдвиг в одном из каналов может быть определен по формуле

$$\Delta \Phi = \frac{\partial \varphi}{\partial f} \Delta f, \quad (18)$$

где $\frac{\partial \varphi}{\partial f}$ — крутизна фазочастотной характеристики в град/гц; Δf — девиация частоты от нестабильности.

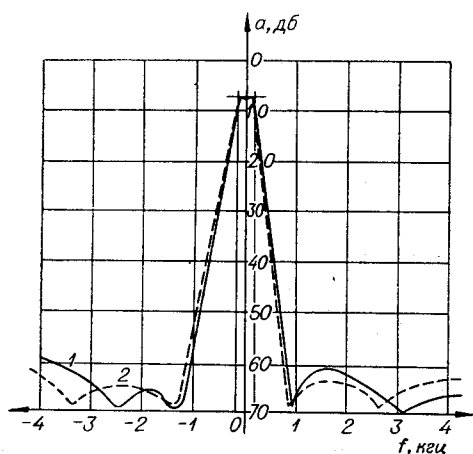


Рис. 4. Экспериментальные кривые избирательности кварцевых фильтров.

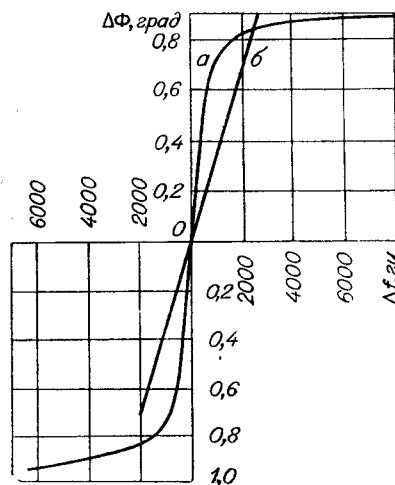


Рис. 5. Фазочастотная характеристика кварцевого фильтра, рассматриваемая при большом (а) и малом (б) изменении (девиации) частоты.

Необходимое уменьшение девиации частоты должно осуществляться подбором кварцевого резонатора и соответствующим термостатированием. ТКЧ примененного кварцевого резонатора равен $\eta = 4 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне температур 60—65°С. Система термостатирования с непрерывным регулированием обеспечивает нестабильность поддержания температуры 65°С в пределах $\Delta T = \pm 0,4^\circ\text{С}$. Последнее обеспечивает снижение нестабильности частоты до $2 \cdot 10^{-6}$.

Абсолютное колебание частоты сигнала, подаваемого на смеситель, равно $\Delta f = 1,8 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,36$ гц. Зная это, по рис. 5, б легко определить крутизну фазочастотной характеристики, которая равна $\frac{\partial \varphi}{\partial f} = 0,37$ град/гц.

Фазовый сдвиг в одном из двух каналов определяется по формуле (18) и равен $\Delta \Phi_{1к, 2к} = 0,142^\circ$. Фазовый сдвиг на выходах $U_{в1}$, $U_{в2}$ находим как разность фазовых сдвигов каналов

$$\Delta \psi = \Delta \Phi_{1к} - \Delta \Phi_{2к}. \quad (19)$$

В настоящее время практически не удается изготовить два или более одинаковых кварцевых фильтров, фазочастотные характеристики которых различались бы менее чем на 3—8%. В разработанной установке разница в фильтрах была сведена к 5%, в связи с чем выражение (19) примет вид

$$\Delta \psi = 2 \cdot 0,05 \cdot \Delta \Phi_{1к, 2к}$$

и дополнительная погрешность фазового сдвига из-за нестабильности частоты не превысит величины 0,014—0,013°.

Таким образом, экспериментально выполненный и исследованный двухканальный преобразователь частоты обеспечивает поверку фазометрической аппаратуры на частотах 20 и 200 кГц и в плавном диапазоне звуковых частот 20—20000 Гц с использованием дополнительного блока смесителей частоты, где имеется перестраиваемый гетеродин в пределах 180—200 кГц.

Погрешность установки фазового сдвига при использовании индикатора ЭЛИ, согласно экспериментам, не превышает на частоте 20 кГц 0,02—0,03°, на частоте 200 кГц 0,043° и в плавном диапазоне 0,05°.

Описанный метод воспроизведения фазовых сдвигов между двумя напряжениями на повышенных и высоких частотах можно рекомендовать в качестве исходного при построении образцовой фазометрической аппаратуры.

Теоретические исследования показали, что погрешность метода может быть снижена до величины 0,04—0,05°. Проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили теоретические положения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Д. Колтик. Работы ВНИИМ в области фазовых измерений.—Труды ВНИИМ, вып. 76 (136), 1964.
2. Е. Д. Колтик, Б. С. Таубе, А. А. Кулемин. Фазометрическая установка Ф-200.—Измерительная техника, 1965, № 8.
3. С. А. Кравченко. Способ задания фазового сдвига на высоких частотах. Авторское свидетельство № 203778.—ИПОТЗ, 1967, № 21.
4. О. П. Галахова, Е. Д. Колтик. Метод и аппаратура для градуировки фазовращателей звукового диапазона частот.—Труды институтов Госкомитета, вып. 82 (142) [б. г., б. и.].
5. В. Н. Шадрин. Фазовое управление с магнитной ленты. М., «Энергия», 1964.

Поступила в редакцию
18 января 1968 г.