

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, КОНТРОЛЬНЫЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.373(088.8)

Ю. А. СКРИПНИК

(Киев)

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОДНОКАНАЛЬНЫХ ТРАКТАХ

В информационно-измерительных системах в качестве носителя информации об измеряемой величине все чаще используются фазовые сдвиги гармонических сигналов. При частоте сигналов свыше 0,1—1 МГц в схемах выделения фазовой информации обычно применяют гетеродинное преобразование частоты входных сигналов с целью переноса фазового сдвига на сигналы низкой частоты, на которой и производятся измерения [1]. Двухканальное преобразование входных сигналов приводит к дополнительной погрешности из-за паразитных межканальных связей, в частности связей через общий гетеродин на частоте сигналов и через измеряемый четырехполюсник на частоте гетеродинного напряжения. Эту погрешность можно значительно уменьшить, если перейти на одноканальные схемы поочередного преобразования частоты пакетов входных сигналов без отдельного преобразования опорного сигнала [2]. В этом случае возникает задача выделения информации о фазовых сдвигах из пакетного напряжения без сравнения его с фазой опорного сигнала.

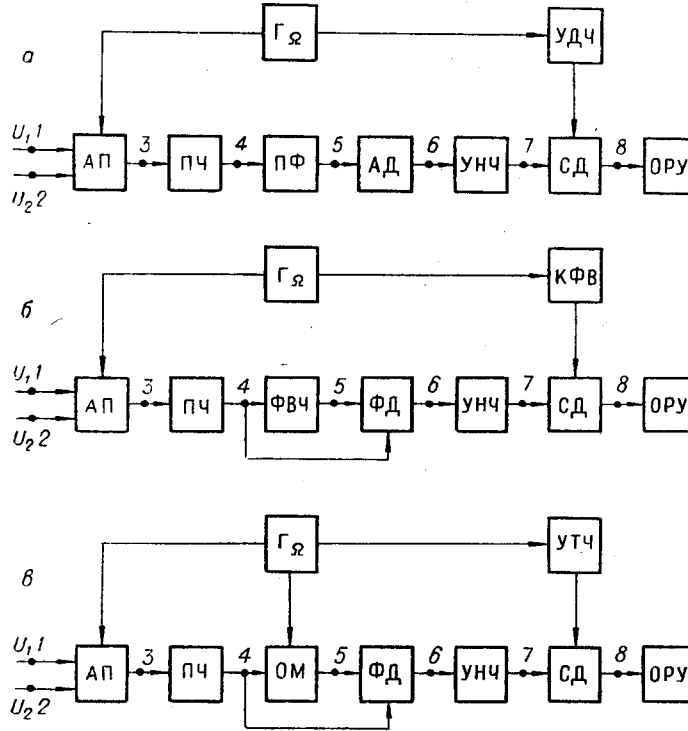
Выделение фазовой информации в одноканальных преобразовательных трактах можно осуществить путем «запоминания» фазы напряжения одного из пакетов с помощью синхрогенератора [3]. Однако неизбежная частотная расстройка синхрогенератора, особенно при низкой частоте коммутации, обуславливает значительные фазовые искажения, что ухудшает метрологические свойства одноканальных схем [2, 3].

Ниже анализируется возможность выделения фазовой информации в одноканальных трактах путем преобразования спектра пакетного напряжения фильтровыми или модуляционными методами и последующего детектирования результирующих колебаний.

При коммутационном преобразовании гармонических напряжений $U_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$; $U_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$ выходное напряжение автоматического переключателя АП (см. рисунок) представляет собой амплитудно-фазомодулированное напряжение с коэффициентом амплитудной модуляции $m = \frac{U_{m1} - U_{m2}}{U_{m1} + U_{m2}}$ и индексом фазовой модуляции $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ [4]

$$U_3 + U_\omega (1 + m \operatorname{sign} \sin \Omega t) \sin \left(\omega t + \varphi_\omega + \frac{\Delta\varphi}{2} \operatorname{sign} \sin \Omega t \right). \quad (1)$$

В [5] показано, что пакетное напряжение, формируемое автоматическим переключателем АП, можно также рассматривать как сумму гармонических напряжений «несущей» частоты ω и «боковых» частот вида $\omega \pm n\Omega$. Полагая для простоты $m = 0$ ($U_{m1} = U_{m2} = U_{\omega}$), что легко выполнить путем амплитудного ограничения пакетного напряе-



Методы выделения фазовой информации в одноканальных трактах периодического преобразования:

а — метод выделения симметричных боковых частот; *б* — метод выделения верхней боковой полосы частот; *в* — метод смещения частотного спектра; АП — автоматический переключатель; Γ_{Ω} — коммутационный генератор; ПЧ — преобразователь частоты; ПФ — полосовой фильтр; АД — амплитудный детектор; УНЧ — усилитель низкой частоты коммутации; СД — синхронный детектор; ОРУ — отсчетно-регистрирующее устройство; УДЧ — удвоитель частоты; ФВЧ — фильтр верхних частот; ФД — фазовый детектор; КФВ — квадратурный фазовращатель; ОМ — однополосный модулятор; УТЧ — утроитель частоты.

ния в частотно-преобразовательном тракте, фазомодулированное напряжение (1) с низкочастотным значением «несущей» ω_2 можно представить в виде [5]

$$U_4 = U_{\omega} \left\{ \cos \frac{\Delta \varphi}{2} \sin (\omega_2 t + \varphi_{\omega}) + \frac{2}{\pi} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} \times \right. \\ \left. \times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [\omega_2 t + (2n-1)\Omega t + \varphi_{\omega}]}{2n-1} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [\omega_2 t - (2n-1)\Omega t + \varphi_{\omega}]}{2n-1} \right] \right\}, \quad (2)$$

где первый член представляет собой несущую, а два других члена — верхние и нижние боковые частоты.

Если с помощью полосового фильтра ПФ (см. рисунок, *а*) подавить несущую и выделить ближайшие две боковые частоты, то результи-

рующее напряжение можно представить в виде напряжения биений двух боковых частот. Суммируя первые гармоники второго и третьего членов напряжения (2), получаем

$$U_5 = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} U_{\omega} \sin \Omega t \cos (\omega_2 t + \varphi_{\omega}). \quad (3)$$

Если в процессе преобразования частоты сохранилось условие $\Omega < \omega_2$, то путем амплитудного детектирования из биений можно выделить низкочастотную огибающую. Для детектирования модулированного колебания пригодно линейное детектирование, у которого функциональное уравнение имеет вид $y = |x|$. Воспользовавшись тем, что абсолютная величина произведения (3) равна произведению абсолютных величин сомножителей [6], можем записать

$$U_6 = \frac{4 k_{65}}{\pi} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} |\sin \Omega t| |\cos (\omega_2 t + \varphi_{\omega})| U_{\omega}. \quad (4)$$

Выражая абсолютные значения сомножителей рядом Фурье, найдем

$$U_6 = \frac{16 k_{65}}{\pi^3} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n \Omega t}{4n^2 - 1} \right) \times \\ \times \left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k \cos 2k (\omega_2 t + \varphi_{\omega})}{4k^2 - 1} \right) U_{\omega}. \quad (5)$$

В выражении (5) содержатся четные гармоники напряжения коммутации, которые нетрудно отделить от высокочастотных составляющих с помощью низкочастотного усилителя Y_{Ω} . Из спектра гармоник с помощью синхронного детектора СД, управляемого напряжением удвоенной частоты коммутации, выделяется напряжение

$$U_8 = S_{83} U_{\omega} \sin \frac{\Delta \varphi}{2}, \quad (6)$$

где $S_{83} = \frac{16 k_{65}}{\pi^3} k_{76} k_{87}$ — крутизна преобразования одноканального тракта.

Для выделения фазовой информации из фазомодулированного напряжения может быть использован и фазовый детектор, опорным напряжением для которого служит часть фазомодулированного напряжения, выделенная фильтром верхних частот (см. рисунок, б):

$$U_6 = \frac{2}{\pi} k_{54} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} U_{\omega} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [\omega_2 t + (2n - 1) \Omega t + \varphi_{\omega}]}{2n - 1}. \quad (7)$$

Фазовый детектор ФД в функциональном отношении можно представить устройством, осуществляющим перемножение двух сигналов [7]:

$$U = S U_1(t) U_2(t), \quad (8)$$

где S — крутизна преобразования ФД в $1/\delta \cdot \text{град}$.

Низкочастотная часть спектра выходного напряжения ФД после преобразования U_4 и U_5 в соответствии с функциональным уравнением (8) имеет вид

$$U_{6 \text{ н. ч.}} = \frac{k_{54} U_{\omega}^2 S_{\delta}}{\pi} \left[\sin \Delta \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos (2n - 1) \Omega t}{2n - 1} + \right. \\ \left. + \frac{4}{\pi} \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2 (2n - 1) \Omega t}{2n - 1} \right]. \quad (9)$$

Напряжение (9) усиливается и поступает на синхронный детектор СД, опорным напряжением которого служит коммутационное напряжение, сдвинутое по фазе на 90° . В результате детектирования сигнал, поступающий на ОРУ, будет определяться выражением

$$U_8 = S_{83} U_\omega^2 \sin \Delta \varphi. \quad (10)$$

Так как пакетное напряжение имеет дискретный спектр, то схема рисунка, б позволяет работать и с нестабильными по частоте сигналами, если нестабильность частоты равна $\pm \Delta \omega \leq \frac{\Omega}{2}$.

Выделение фазовой информации в одноканальных преобразовательных трактах можно осуществить также способами, основанными на использовании переходных процессов с последующим амплитудным [8] или частотным детектированием [9].

При больших изменениях частоты сравниваемых сигналов или при соотношении частот $\eta = \frac{\omega}{\Omega} > 10^3$ фильтровые и упомянутые методы [8, 9] малоэффективны. В этих случаях в качестве опорного напряжения ФД целесообразно использовать само фазомодулированное напряжение, спектр которого смещен по частоте на величину, равную частоте коммутации [10]. Для такого преобразования спектра может быть использован однополосный модулятор ОМ (см. рисунок, в), на который в качестве модулирующего напряжения подается низкочастотное напряжение от генератора Γ_Ω . Если выполнить однополосный модулятор широкополосным [11], то все спектральные составляющие фазомодулированного напряжения (2) будут смещены по частоте на величину, равную частоте модуляции ($\Delta \omega = \Omega$). При этом выходное напряжение ОМ будет иметь вид

$$U_5 = k_{54} U_\omega \cos \frac{\Delta \varphi}{2} \sin [(\omega_2 + \Omega) t + \varphi_\omega] + \frac{2}{\pi} \sin \frac{\Delta \varphi}{2} \times \\ \times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin (\omega_2 t + 2n \Omega t + \varphi_\omega)}{2n-1} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [\omega_2 t - 2(n-1) \Omega t + \varphi_\omega]}{2n-1} \right]. \quad (11)$$

После перемножения напряжений (2) и (11) в ФД с учетом соотношения $\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \approx 1$ получаем

$$U_{6 \text{ н. ч.}} = k_{54} S_6 U_\omega^2 \left\{ \cos \Omega t - \frac{4}{\pi^2} \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2} \times \right. \\ \left. \times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos (4n-3) \Omega t + \cos (4n-1) \Omega t}{(2n-1)^2} \right] \right\}. \quad (12)$$

Как следует из выражения (12), в спектре выходного напряжения ФД содержится напряжение утроенной частоты коммутации 3Ω , пропорциональное разности фаз сравниваемых сигналов.

Синхронный детектор СД, опорным напряжением которого служит выходное напряжение утроителя частоты УТЧ, преобразует это напряжение в постоянное напряжение

$$U_8 = \frac{4 S_{83} U_\omega^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\Delta \varphi}{2}. \quad (13)$$

Для малых фазовых углов

$$U_8 = S_{83} U_{\omega}^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{\pi} \right)^2, \quad (14)$$

где $\Delta \varphi$ — выражено в радианах. Результат преобразования не зависит от нестабильности несущей частоты ω_2 и соотношения частоты η .

Таким образом, для выделения фазовой информации из высокочастотных сигналов с минимальными погрешностями целесообразно применение методов поочередного преобразования сравниваемых по фазе сигналов в одноканальном частотно-преобразовательном тракте. При стабильной частоте сравниваемых сигналов выделение фазовой информации можно осуществить амплитудным детектированием фазомодулированного напряжения с подавленными несущей и крайними боковыми частотами. При частотной нестабильности сравниваемых сигналов и малом отношении частот $\eta < 10^3$ эффективно фазовое детектирование с опорным сигналом, выделенным из фазомодулированного напряжения фильтром верхних частот. При большой частотной нестабильности или отношении частот $\eta \geq 10^3$ опорным сигналом может служить фазомодулированное напряжение, смещенное по частоте однополосным модулятором на значение частоты коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Вишенчук, А. Ф. Котюк, Л. Я. Мизюк. Электромеханические и электронные фазометры. М., Госэнергоиздат, 1962.
2. А. Д. Ниженский, Ю. А. Скрипник. Компенсационные фазоизмерительные схемы периодического сравнения.— В сб. «Повышение точности и автоматизация измерительных схем». Киев, «Наукова думка», 1965.
3. В. И. Медведев. Одноканальный фазометр с умножением частоты.— Приборы и техника эксперимента, 1960, № 3.
4. Ю. А. Скрипник. Методы измерительных преобразований и структура электронных приборов.— Измерительная техника, 1969, № 4.
5. Ю. А. Скрипник. Коммутационные схемы сравнения автоматических приборов переменного тока.— В сб. «Контрольно-измерительная техника», вып. 6. Львов, 1969.
6. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. М., Физматгиз, 1962.
7. В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин. Фазовая автоподстройка частоты. М., «Связь», 1966.
8. В. В. Молебный. Некоторые вопросы измерения быстрых изменений фазы.— Автоматический контроль и методы электрических измерений, т. 1. Труды конференции. Новосибирск, «Наука», 1965.
9. Ф. Б. Гриневиц. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
10. Ю. А. Скрипник. Способ измерения малых разностей фаз двух синусоидальных напряжений. Авторское свидетельство № 213978.— ИПОТЗ, 1968, № 11.
11. В. П. Кашлев, В. П. Рудниченко. Широкополосные фазовращатели на диапазон частот 100 гц — 10 Мгц.— В сб. «Приборостроение», вып. 2. Киев, «Техника», 1966.

Поступила в редакцию
11 января 1968 г.,
окончательный вариант —
25 сентября 1969 г.