



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГКНТ СССР

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

(21) 4899389/21

(22) 03.01.91

(46) 07.11.92. Бюл. № 41

(71) Белорусский политехнический институт

(72) Ф.А.Романюк и В.Ю.Румянцев

(56) Авторское свидетельство СССР
№ 1707560, кл. G 01 R 23/00, 1988.

(54) СПОСОБ КОНТРОЛЯ РАЗНОСТИ ЧАСТОТ ДВУХ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

(57) Изобретение относится к измерительной технике и может быть применимо для контроля разности частот двух низкочастотных синусоидальных сигналов. Способ контроля разности частот двух синусоидальных сигналов, основанный на одновременном измерении в начале и в конце эталонного интервала времени мгновенных значений двух пар синусоидальных сигналов, сдвинутых по фазе в каждой паре на угол $\pi/2$. отличается тем, что, с целью повышения точности и расширения функциональных возможностей способа, из первого и второго исходных сигналов путем сдвига последних в произвольную сторону без изменения амплитуд на установленные углы получают первый и второй сдвинутые сигналы, форми-

2

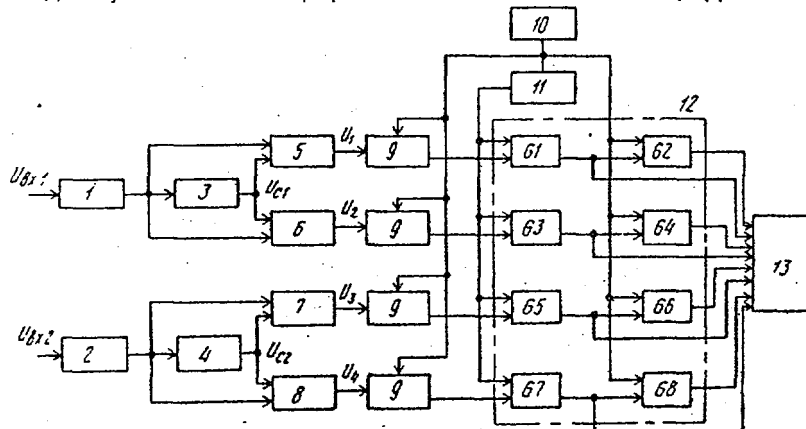
руют первый и второй дополнительные сигналы как сумму и разность первых исходного и сдвинутого сигналов и третий и четвертый дополнительные сигналы, как сумму и разность вторых исходного и сдвинутого сигналов, фиксируют по два мгновенных значения каждого из четырех дополнительных сигналов, разность частот определяют согласно формуле

$$\Delta f = \text{Sign}(y-x) \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos(x \cdot y + \sqrt{(1-x^2)(1-y^2)}),$$

$$x = \frac{U_{22} \cdot U_{21}(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{12} \cdot U_{11}(U_{22}^2 - U_{21}^2)}{U_{21}^2(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{11}^2(U_{22}^2 - U_{21}^2)};$$

$$y = \frac{U_{42} \cdot U_{41}(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{32} \cdot U_{31}(U_{42}^2 - U_{41}^2)}{U_{41}^2(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{31}^2(U_{42}^2 - U_{41}^2)}$$

где U_{11} , U_{21} , U_{31} , U_{41} , U_{12} , U_{22} , U_{32} , U_{42} — мгновенные значения первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов в начале и конце эталонного интервала времени Δt . Устройство для реализации способа содержит преобразователи 1, 2 напряжения, фазовращатели 3, 4, сумматоры 5, 7, вычитатели 6, 8, четыре аналого-цифровых преобразователя 9, управляемый генератор 10 импульсов, элемент 11 задержки, блок 12 памяти, цифровой индикатор 13. 3 ил.



Фиг.3

Изобретение относится к электротехнике, а именно к электрическим измерениям, и предназначено для контроля разности частот двух низкочастотных синусоидальных сигналов.

Известен способ контроля разности частот двух синусоидальных сигналов (авт. св. СССР № 1345286, кл. Н 02 J 3/06, опублик. 1987), при котором фиксируют по три мгновенных значения каждого из двух контролируемых напряжений через эталонные промежутки времени и по этим значениям определяют модуль разности частот.

Указанный способ обладает ограниченными функциональными возможностями вследствие его неработоспособности в случае, когда в момент фиксации второго мгновенного значения один из контролируемых сигналов проходит через ноль.

Наиболее близким к предлагаемому по сущности и достигаемому результату является способ контроля разности частот двух синусоидальных сигналов (авт. св. СССР № 1707560, кл. G 01 R 23/00, Н 02 Н 3/06, 26.07.88), при котором одновременно измеряют мгновенные значения этих сигналов, формируют эталонные промежутки времени и фиксируют следующие через них мгновенные значения первого и второго контролируемых сигналов, дополнительно сдвигают каждый из сигналов на угол $\pi/2$, измеряют мгновенные значения сдвинутых сигналов одновременно с измерением мгновенных значений контролируемых сигналов, фиксируют по два значения каждого из упомянутых сигналов, следующих через эталонный промежуток времени, и по зафиксированным значениям контролируемых и сдвинутых сигналов определяют модуль разности частот.

Основной недостаток данного способа заключается в потере точности вычисления модуля разности частот при отклонении частот контролируемых напряжений от расчетных значений, т.к. в этом случае создаваемые фазосдвигающими элементами фазовые сдвиги отличаются от заданных $\pi/2$. Кроме того, указанный способ не позволяет определить знак разности частот, что ограничивает его функциональные возможности.

Цель изобретения – повышение точности и расширение функциональных возможностей способа.

На фиг.1 и 2 поясняется сущность способа; на фиг.3 представлена структурная схема аналого-цифрового устройства для реализации способа.

Способ контроля разности частот двух синусоидальных сигналов основан на сдвиге каждого исходного сигнала в произвольную сторону без изменения амплитуды на установленный угол, определяемый допустимой погрешностью и быстродействием измерения, формировании первых и вторых дополнительных сигналов соответственно как суммы и разности первых исходного и сдвинутого сигналов, третьего и четвертого дополнительных сигналов как суммы и разности вторых исходного и сдвинутого сигналов и фиксации в начале и в конце эталонного промежутка времени мгновенных значений каждого из четырех дополнительных сигналов.

Разность частот определяют согласно математическому выражению

$$\Delta f = \text{Sign}(y-x) \frac{1}{2\pi \Delta t} \arccos(x \cdot y + \sqrt{(1-x^2)(1-y^2)})$$

$$\text{где } x = \frac{U_{22} \cdot U_{21}(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{12} \cdot U_{11}(U_{22}^2 - U_{21}^2)}{U_{21}^2(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{11}^2(U_{22}^2 - U_{21}^2)}$$

$$y = \frac{U_{42} \cdot U_{41}(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{32} \cdot U_{31}(U_{42}^2 - U_{41}^2)}{U_{41}^2(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{31}^2(U_{42}^2 - U_{41}^2)}$$

$U_{11}, U_{21}, U_{31}, U_{41}$ – мгновенные значения соответственно первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов в начале эталонного интервала времени;

$U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}$ – мгновенные значения соответственно первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов в конце эталонного интервала времени;

Δt – эталонный интервал времени.

Сущность способа определения разности частот двух синусоидальных сигналов состоит в следующем.

Предположим, что первый исходный синусоидальный сигнал $U_{вх1}$ сдвигают на установленный для заданного значения частоты ω_1 угол α (фиг.1а):

$$U_{с1} = U_{вх1} e^{j\alpha(\omega_1)} \quad (2)$$

Операцию сдвига выполняют таким образом, чтобы амплитуды исходного $U_{вх1, \text{макс}}$ и сдвинутого $U_{с1, \text{макс}}$ сигналов на всех частотах были равны $U_{вх1, \text{макс}} = U_{с1, \text{макс}}$. Установленное значение угла α выбирают по двум критериям: допустимой погрешности и быстродействию измерения. Минимальная погрешность измерения обеспечивается при угле α , близком к $\pi/2$, для заданной частоты, являющейся средним значением диапазона измерения за счет выравнивания амплитуд дополнительных сигналов.

Максимальное быстродействие измерения достигается при угле α , близком к 0. Поэтому оптимальный угол α находится в диапазоне от 0 до $\pi/2$, а его установленное значение выбирается в зависимости от того, какой из критериев является определяющим.

Первый дополнительный сигнал \dot{U}_1 и второй дополнительный сигнал \dot{U}_2 формируют из первого исходного $\dot{U}_{вх1}$ и сдвинутого по отношению к нему без изменения амплитуды на установленный угол α сигнала $\dot{U}_{с1}$ по соотношениям

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_{с1} + \dot{U}_{вх1}; \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_{с1} - \dot{U}_{вх1}. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку амплитуды сигналов $U_{вх1}$ и $U_{с1}$ равны на всех частотах, дополнительные сигналы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 всегда являются диагоналями ромба, образованного векторами $\dot{U}_{вх1}$ и $\dot{U}_{с1}$, в связи с чем угол между векторами \dot{U}_1 и \dot{U}_2 составляет $\pi/2$ и не зависит от фазового сдвига α между $\dot{U}_{вх1}$ и $\dot{U}_{с1}$, а следовательно, и от частоты исходного сигнала. Сдвигая второй исходный сигнал $\dot{U}_{вх2}$ на установленный угол β и рассуждая аналогично, получают из второго сдвинутого сигнала $\dot{U}_{с2} = \dot{U}_{вх2} e^{j\beta(\omega_2)}$ третий \dot{U}_3 и четвертый \dot{U}_4 дополнительные сигналы (фиг.16):

$$\begin{cases} \dot{U}_3 = \dot{U}_{с2} + \dot{U}_{вх2}; \\ \dot{U}_4 = \dot{U}_{с2} - \dot{U}_{вх2}. \end{cases} \quad (4)$$

Для произвольного момента времени t , соответствующего началу эталонного интервала Δt , мгновенные значения дополнительных сигналов \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_3 и \dot{U}_4 определяются как

$$\begin{cases} U_{11} = U_{m1} \sin \omega_1 t; \\ U_{21} = U_{m2} \cos \omega_1 t; \\ U_{31} = U_{m3} \sin \omega_2 t; \\ U_{41} = U_{m4} \cos \omega_2 t. \end{cases} \quad (5)$$

где U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , U_{m4} — амплитуды соответственно первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов;

ω_1 и ω_2 — угловые частоты первого и второго сигналов.

Мгновенные значения дополнительных сигналов для момента времени $(t + \Delta t)$, соответствующего концу эталонного интервала, определяются как

$$\begin{cases} U_{12} = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \omega_1 \Delta t); \\ U_{22} = U_{m2} \cos(\omega_1 t + \omega_1 \Delta t); \\ U_{32} = U_{m3} \sin(\omega_2 t + \omega_2 \Delta t); \\ U_{42} = U_{m4} \cos(\omega_2 t + \omega_2 \Delta t). \end{cases} \quad (6)$$

Выражения (5), (6) образуют систему из восьми уравнений, в которых неизвестными являются ω_1 , ω_2 , U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , U_{m4} , $\omega_1 \Delta t$, $\omega_2 \Delta t$. Решение этой системы относительно ω_1 и ω_2 выполняют в следующей последовательности.

В выражениях (6) заменяют $U_{m1} \sin \omega_1 t$, $U_{m2} \cos \omega_1 t$, $U_{m3} \sin \omega_2 t$, $U_{m4} \cos \omega_2 t$ их значениями из уравнений (5)

$$\begin{cases} U_{12} = U_{11} \cos \omega_1 \Delta t + \frac{U_{21} U_{m1}}{U_{m2}} \sin \omega_1 \Delta t; \\ U_{22} = U_{21} \cos \omega_1 \Delta t - \frac{U_{11} U_{m2}}{U_{m1}} \sin \omega_1 \Delta t; \\ U_{32} = U_{31} \cos \omega_2 \Delta t + \frac{U_{41} U_{m3}}{U_{m4}} \sin \omega_2 \Delta t; \\ U_{42} = U_{41} \cos \omega_2 \Delta t - \frac{U_{31} U_{m4}}{U_{m3}} \sin \omega_2 \Delta t. \end{cases} \quad (7)$$

Из первого и третьего уравнений (7) определяют $\sin \omega_1 \Delta t$ и $\sin \omega_2 \Delta t$ и подставляют соответственно во второе и четвертое уравнения. После несложных преобразований получают

$$\begin{cases} U_{22} = U_{21} \cos \omega_1 \Delta t - \\ - \frac{U_{11} U_{m2}^2}{U_{21} U_{m1}^2} (U_{12} - U_{11} \cos \omega_1 \Delta t); \\ U_{42} = U_{41} \cos \omega_2 \Delta t - \\ - \frac{U_{31} U_{m4}^2}{U_{41} U_{m3}^2} (U_{32} - U_{31} \cos \omega_2 \Delta t). \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения (5), (6) разрешают относительно U_{m1}^2 , U_{m2}^2 , U_{m3}^2 , U_{m4}^2 :

$$\begin{cases} U_{m1}^2 = \frac{U_{11}^2 \cdot U_{22}^2 - U_{21}^2 \cdot U_{12}^2}{U_{22}^2 - U_{21}^2}; \\ U_{m2}^2 = \frac{U_{21}^2 \cdot U_{12}^2 - U_{11}^2 \cdot U_{22}^2}{U_{12}^2 - U_{11}^2}; \\ U_{m3}^2 = \frac{U_{31}^2 \cdot U_{42}^2 - U_{41}^2 \cdot U_{32}^2}{U_{42}^2 - U_{41}^2}; \\ U_{m4}^2 = \frac{U_{41}^2 \cdot U_{32}^2 - U_{31}^2 \cdot U_{42}^2}{U_{32}^2 - U_{31}^2}. \end{cases} \quad (9)$$

В уравнении (8) U_{m1}^2 , U_{m2}^2 , U_{m3}^2 , U_{m4}^2 заменяют их значениями из выражений (9) и разрешают относительно $\cos \omega_1 \Delta t$ и $\cos \omega_2 \Delta t$:

$$\begin{cases} x = \cos \omega_1 \Delta t = \frac{u_{22} \cdot u_{21}(u_{12}^2 - u_{11}^2) - u_{12} u_{11}(u_{22}^2 - u_{21}^2)}{u_{21}^2(u_{12}^2 - u_{11}^2) - u_{11}^2(u_{22}^2 - u_{21}^2)}; \\ y = \cos \omega_2 \Delta t = \frac{u_{42} \cdot u_{41}(u_{32}^2 - u_{31}^2) - u_{32} u_{31}(u_{42}^2 - u_{41}^2)}{u_{41}^2(u_{32}^2 - u_{31}^2) - u_{31}^2(u_{42}^2 - u_{41}^2)}. \end{cases}$$

Учитывая, что $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$, модуль разности частот $|\Delta f| = |f_1 - f_2|$ определяется согласно выражению

$$\begin{aligned} |\Delta f| &= \frac{1}{2\pi \Delta t} |(\omega_1 \Delta t - \omega_2 \Delta t)| = \\ &= \frac{1}{2\pi \Delta t} |(\arccos x - \arccos y)|. \end{aligned}$$

Используя далее известную формулу преобразования разности двух обратных тригонометрических функций

$$\begin{aligned} \arccos x - \arccos y &= \pm \arccos(x y + \\ &+ \sqrt{(1-x^2)(1-y^2)}), \end{aligned}$$

где знак "+" берется при $x < y$, а знак "-" — при $x \geq y$, получают окончательную формулу (1) для вычисления разности частот Δf двух синусоидальных сигналов.

К непосредственно используемым параметрам при вычислении разности частот по формуле (1) относятся мгновенные значения четырех дополнительных сигналов, измеренные один временно в начале и в конце эталонного интервала времени.

Гибридное аналого-цифровое устройство для реализации предложенного способа (фиг.3) содержит преобразователи 1, 2 напряжения, на входы которых подаются соответственно входные напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, фазовращатели 3, 4, сумматоры 5, 7, вычитатели 6, 8, четыре аналого-цифровых преобразователя 9, управляемый генератор 10 импульсов, элемент 11 задержки, блок 12 памяти, состоящий из восьми регистров G1-G8 памяти, и блок 13 цифровой индикации, включающий восемь элементов, каждый из которых представляет собой последовательно соединенные дешифратор и цифровой индикатор

Выходы преобразователей 1 и 2 напряжения подключены соответственно к входам фазовращателей 3 и 4, причем выход фазовращателя 3 соединен с первыми входами сумматора 5 и вычитателя 6, на вторые входы которых подается входное напряжение $U_{вх1}$, а выход фазовращателя 4 соединен с первыми входами сумматора 7 и вычитателя 8, на вторые входы которых подается входное напряжение $U_{вх2}$. Выходы сумматора 5, вычитателя 6, сумматора 7 и вычитателя 8 являются входами соответственно первого, второго, третьего и четвер-

того аналого-цифровых преобразователей 9, управляющие входы которых соединены с выходом управляемого генератора 10 импульсов, а выходы присоединены соответственно к информационным входам первого G1, третьего G3, пятого G5, седьмого G7 регистров памяти блока 12 памяти. Управляющие входы упомянутых регистров через элемент 11 задержки подключены к выходу управляемого генератора 10 импульсов, а их выходы — к информационным входам второго G2, четвертого G4, шестого G6, восьмого G8 регистров памяти блока 12 памяти. Управляющие входы этих регистров присоединены к выходу управляемого генератора 10 импульсов, выходы первого G1, второго G2, третьего G3, четвертого G4, пятого G5, шестого G6, седьмого G7, восьмого G8 регистров памяти блока 12 памяти подключены к соответствующим входам блока 13 цифровой индикации.

Устройство работает следующим образом.

Переменные напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, частоты которых f_1 и f_2 , поступают соответственно на входы преобразователей 1 и 2 напряжения, выполняющих также функцию гальванического разделителя цепей контролируемых напряжений и цепей устройства, и преобразуются в пропорциональные напряжения с заданными амплитудными значениями. Выходное напряжение преобразователя 1 подается на вход фазовращателя 3 и вторые входы сумматора 5 и вычитателя 6. На выходе фазовращателя 3 получается напряжение $U_{с1}$ такой же амплитуды, как и входное, но сдвинутое по отношению к нему на установленный угол, которое поступает на первые входы сумматора 5 и вычитателя 6. Аналогично выходное напряжение преобразователя 2 подается на вход фазовращателя 4 и вторые входы сумматора 7 и вычитателя 8. На выходе фазовращателя 4 получается напряжение $U_{с2}$, поступающее на первые входы сумматора 7 и вычитателя 8. Выходные напряжения сумматора 5 U_1 , вычитателя 6 U_2 , сумматора 7 U_3 , вычитателя 8 U_4 поступают на аналоговые входы соответственно первого, второго, третьего, четвертого аналого-цифровых преобразователей 9. После запуска управляемый генератор 10 импульсов с интервалом Δt вырабатывает два последовательных импульса, которые подаются на управляющие входы аналого-цифровых преобразователей 9, управляющие входы второго G2, четвертого G4, шестого G6, восьмого G8 регистров памяти блока 12 памяти, а также на вход элемента 11 задержки.

При поступлении очередного импульса одновременно запускаются все четыре аналого-цифровых преобразователя, а также производится запись содержимого первого G1, третьего G3, пятого G5, седьмого G7 5 регистров соответственно во второй G2, четвертый G4, шестой G6, восьмой G8 регистры блока 12 памяти. После появления импульса на выходе элемента 11 задержки, к моменту которого заканчивается процесс аналого-цифрового преобразования, цифровые коды мгновенных значений напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 с выходов первого, второго, третьего и четвертого аналого-цифровых преобразователей записываются соответственно в первый G1, третий G3, пятый G5 и седьмой G7 регистры памяти.

После поступления с интервалом Δt двух импульсов от управляемого генератора 10 импульсов в регистрах блока 12 памяти оказываются записанными во втором G2, четвертом G4, шестом G6, восьмом G8 соответственно $U_{11}, U_{21}, U_{31}, U_{41}$ — результаты первого измерения мгновенных значений напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 , а в первом G1, третьем G3, пятом G5, седьмом G7 регистрах — соответственно $U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}$ — результаты второго измерения мгновенных значений этих напряжений.

Эти результаты с выходов всех регистров блока 12 памяти поступают на соответствующие входы блока 13 цифровой индикации. По результатам цифровой индикации мгновенных значений $U_{11}, U_{21}, U_{31}, U_{41}, U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}$ напряжений с использованием выражения (1) определяют разность частот контролируемых напряжений.

Использование изобретения позволяет по сравнению с прототипом повысить точность определения частот двух синусоидальных сигналов и расширить функциональные возможности способа. Изобретение может быть использовано для построения быстродействующих измерительных органов разности частот устройств релейной защиты и автоматики энергосистем и реализовано с помощью известных решающих элементов, выполненных на базе микроэлектронной техники.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Способ контроля разности частот двух синусоидальных сигналов, основанный на одновременном измерении в начале и в конце эталонного интервала времени мгновенных значений двух пар синусоидальных сигналов, сдвинутых по фазе в каждой паре на угол $\pi/2$, отличающийся тем, что, с целью повышения точности и расширения функциональных возможностей способа, из первого и второго исходных сигналов путем сдвига последних в произвольную сторону без изменения амплитуд на установленные углы, определяемые допустимой погрешностью и быстродействием измерения, получают соответственно первый и второй сдвинутые сигналы, формируют первый и второй дополнительные сигналы соответственно как сумму и разность первых исходного и сдвинутого сигналов, а также третий и четвертый дополнительные сигналы соответственно как сумму и разность вторых исходного и сдвинутого сигналов, фиксируют взятые через эталонный интервал времени по два мгновенных значения каждого из четырех дополнительных сигналов, а разность частот Δf определяют согласно математическому выражению:

$$\Delta f = \text{Sign}(y-x) \frac{1}{2\pi \Delta t} \arccos(x \cdot y + \sqrt{(1-x^2)(1-y^2)}),$$

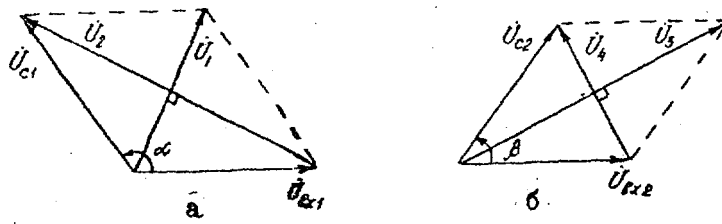
где
$$x = \frac{U_{22} \cdot U_{21}(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{12} \cdot U_{11}(U_{22}^2 - U_{21}^2)}{U_{21}^2(U_{12}^2 - U_{11}^2) - U_{11}^2(U_{22}^2 - U_{21}^2)}$$

$$y = \frac{U_{42} \cdot U_{41}(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{32} \cdot U_{31}(U_{42}^2 - U_{41}^2)}{U_{41}^2(U_{32}^2 - U_{31}^2) - U_{31}^2(U_{42}^2 - U_{41}^2)}$$

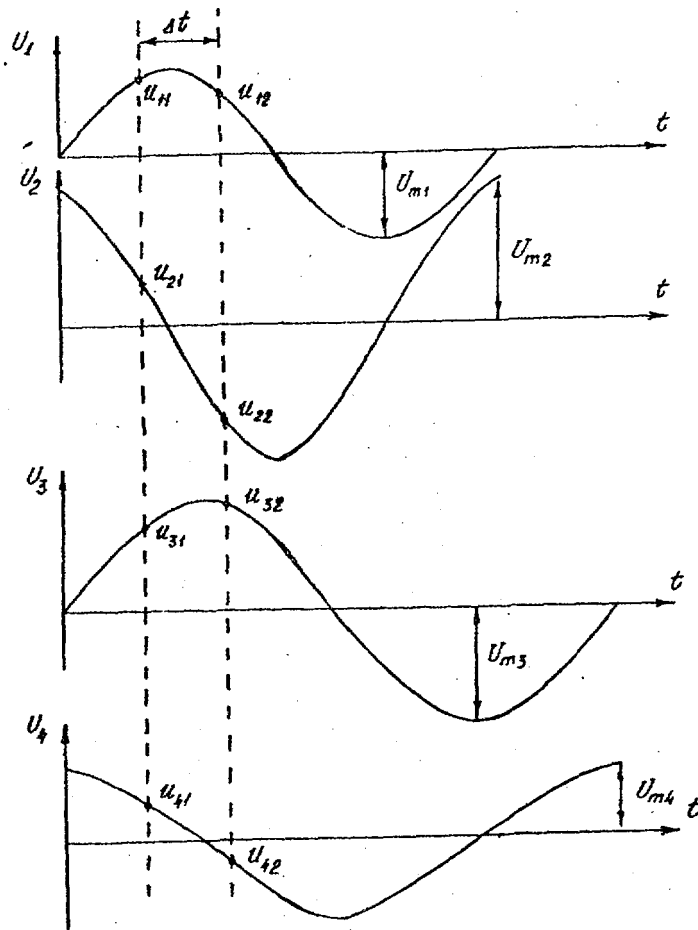
$U_{11}, U_{21}, U_{31}, U_{41}$ — мгновенные значения соответственно первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов в начале эталонного интервала времени;

$U_{12}, U_{22}, U_{32}, U_{42}$ — мгновенные значения соответственно первого, второго, третьего, четвертого дополнительных сигналов в конце эталонного интервала времени;

Δt — эталонный интервал времени.



Фиг. 1



Фиг. 2

Редактор Т.Юрчикова

Составитель Ф.Романюк
Техред М.Моргентал

Корректор П.Геречи

Заказ 3925

Тираж

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул.Гагарина, 101