



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013105942/08, 12.02.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.02.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.02.2013

(43) Дата публикации заявки: 20.08.2014 Бюл. № 23

(45) Опубликовано: 10.12.2014 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1337818 A1, 15.09.1987. RU 2232473 C2, 10.07.2004. US 777576 B2, 17.08.2010. WO 81/01929 A1, 09.07.1981. US 7679463 B2, 16.03.2010

Адрес для переписки:

350072, Краснодарский край, Южный
Федеральный округ, г. Краснодар, ул.
Московская, 5, ЗАО НПК "МЕРА", Вызулину
С.А.

(72) Автор(ы):

Суровенный Владислав Григорьевич (RU),
Волынкин Виталий Анатольевич (RU),
Логоша Александр Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

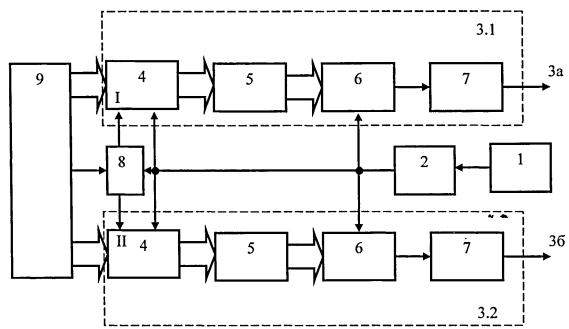
Закрытое акционерное общество "Научно-
производственная компания "Мера" (ЗАО
НПК "МЕРА") (RU)

**(54) СПОСОБ ДИСКРЕТНОГО ЗАДАНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА МЕЖДУ ДВУМЯ
МОНОХРОМАТИЧЕСКИМИ ГАРМОНИЧЕСКИМИ ИЗНАЧАЛЬНО СИНХРОННЫМИ
СИГНАЛАМИ, И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам фазовых измерений электрических сигналов и может быть использовано для аттестации и поверки фазометров, компараторов фазы в диапазоне частот. Достижимый технический результат - расширение диапазона рабочих частот, повышение точности задания угла фазового сдвига и уменьшение дискретности его воспроизведения. Способ дискретного задания фазового сдвига между двумя монохроматическими гармоническими, изначально синхронными сигналами основан на линейной зависимости текущей фазы

периодического сигнала от времени, получаемого в результате сдвига частоты сигнала, при этом манипуляции с частотой производятся непосредственно при цифровом синтезе сдвигаемого по частоте сигнала, а величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала и длительность интервала времени, на которое он производится, могут меняться и контролируются. Устройство содержит блок опорных частот, формирователь стробов, центральный процессор, два идентичных канала, выполненных на основе вычислительного синтезатора. 2 н. и 7 з.п. ф-лы, 1 ил.



Фиг.1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2013105942/08, 12.02.2013**(24) Effective date for property rights:
12.02.2013

Priority:

(22) Date of filing: **12.02.2013**(43) Application published: **20.08.2014** Bull. № 23(45) Date of publication: **10.12.2014** Bull. № 34

Mail address:

**350072, Krasnodarskij kraj, Juzhnyj Federal'nyj
okrug, g. Krasnodar, ul. Moskovskaja, 5, ZAO NPK
"MERA", Vyzulinu S.A.**

(72) Inventor(s):

**Surovennyj Vladislav Grigor'evich (RU),
Volynkin Vitalij Anatol'evich (RU),
Logosha Aleksandr Vladimirovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "Nauchno-
proizvodstvennaja kompanija "Mera" (ZAO
NPK "MERA") (RU)**

(54) **METHOD FOR DISCRETE SETTING OF PHASE SHIFT BETWEEN TWO MONOCHROMATIC HARMONIC INITIALLY SYNCHRONOUS SIGNALS, AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

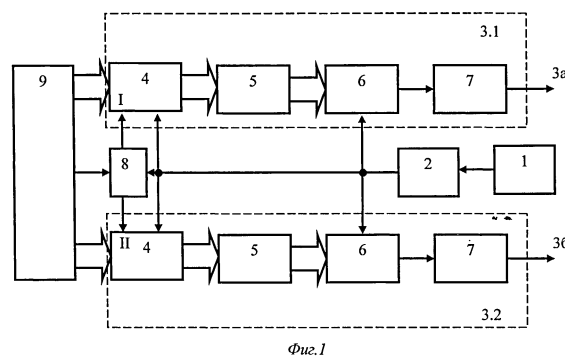
FIELD: instrumentation.

SUBSTANCE: invention relates to phase measurement methods of electrical signals and can be used for certification and calibration of phase meters, phase comparing instruments in a frequency range. A method for discrete setting of a phase shift between two monochromatic harmonic initially synchronous signals is based on a linear dependence of a current phase of a periodic signal on the time obtained as a result of signal frequency shift; with that, frequency manipulations are performed immediately at digital synthesis of a frequency-shifted signal, and a frequency shift value of a shifted signal and time interval duration, for which it is performed, can be changed and are controlled. The device includes a unit of reference frequencies, a strobe shaping unit, a central processor, two identical channels

made based on a calculated synthesiser.

EFFECT: enlarging range of working frequencies, improving setting accuracy of a phase shift angle and reducing its reproduction discreteness.

9 cl, 1 dwg



Изобретение относится к способам фазовых измерений электрических гармонических сигналов и может быть использовано для аттестации и поверки фазометров, компараторов фазы в диапазоне частот от 1 мГц до 100 МГц и фазовых сдвигов от 0 до 360 град и более с минимальной дискретностью воспроизведения не более 0,0001 град.

Известен [1] способ сдвига фазы первого периодического колебания к одному значению, выбранному из как минимум нескольких различных дискретных значений, включающий в себя привнесение задержки на периодическое колебание, время которой определяется выбранным дискретным значением, с получением другого периодического колебания, которое сдвинуто по фазе относительно первого периодического колебания так, что при изменении выбранного значения изменяется привносимая задержка, отличающийся тем, что выбранное дискретное значение повторно устанавливается на начальное значение в ответ на первое периодическое колебание, которое сдвигается указанной задержкой на целое число, кратное примерно одному циклу первого периодического колебания.

Недостатками этого способа являются необходимость учета значения частоты сдвигаемого сигнала, относительная сложность реализации, невысокая точность задания угла фазового сдвига, низкое быстродействие.

Наиболее близким к изобретению по сущности является способ дискретного задания фазового сдвига [2], основанный на линейной зависимости текущей фазы от времени, получаемой в результате преобразования частоты сигналов, которое осуществляют после частотной манипуляции одного из сигналов в моменты совпадения синфазных переходов через уровень манипулируемого и сдвинутого по частоте сигналов, а значение угла фазового сдвига определяют как произведение частотного сдвига на интервал времени, равный суммарному времени посылок манипуляций, деленному на коэффициент деления частоты.

Недостатком этого способа является невысокая точность задания угла фазового сдвига и относительно большая дискретность его воспроизведения. Кроме того, необходимо отметить относительную сложность реализации этого способа. В частности, использование аналоговых цепей в устройстве, реализующем способ, приводит к отсутствию повторяемости параметров при изготовлении и эксплуатации (без применения дополнительных настройки и регулировки), низкому выходу годной продукции и т.п.

Цель изобретения - расширение диапазона рабочих частот, повышение точности задания угла фазового сдвига и уменьшение дискретности его воспроизведения.

На фиг.1 изображена структурная схема устройства.

Устройство для задания фазового сдвига содержит опорный генератор 1, блок опорных частот 2, два идентичных цифровых вычислительных синтезатора 3.1 и 3.2, каждый из которых состоит из последовательно соединенных: аккумулятора фазы 4; преобразователя фаза-амплитуда 5; цифроаналогового преобразователя 6 и фильтра нижних частот 7, формирователя стробов 8 и центрального процессора 9. Цифровые вычислительные синтезаторы 3 содержат также некоторое количество памяти (на Фиг.1 не показано), служащей для хранения параметров синтезируемого сигнала, таких как "приращения фазы", "начальная фаза" и др. Выходы фильтров нижних частот 7 являются выходами 3а и 3б каждого из цифрового вычислительного синтезатора 3 и устройства для задания фазового сдвига в целом. Выход опорного генератора 1 соединен с входом блока опорных частот 2. Выход блока опорных частот 2 соединен с входами "синхроимпульс" устройств непосредственного цифрового синтеза частоты 3, а именно

входами "синхроимпульс" аккумуляторов фазы 4 и цифроаналоговых преобразователей 6, и входом "синхроимпульс" формирователя стробов 8. Работой устройства управляет центральный процессор 9, с выходов которого подаются соответствующие управляющие слова в виде битов на входы регистра "приращения фазы" и регистра "задания начальной фазы" аккумуляторов фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3 и на вход "Пуск" формирователя стробов 8. Выходы формирователя стробов 8 соединены с входами "Пуск" аккумуляторов фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3.

Устройство для задания фазового сдвига работает следующим образом. В процессе формирования устройством для задания фазового сдвига заданного фазового сдвига между двумя монохроматическими гармоническими сигналами частота сигнала, синтезируемого цифровым вычислительным синтезатором 3.1, не изменяется, а частота сигнала, синтезируемого цифровым вычислительным синтезатором 3.2, изменяется. Для определенности будем цифровой вычислительный синтезатор 3.1 называть опорным, а цифровой вычислительный синтезатор 3.2 - ведомым.

Сигнал опорного генератора 1 с частотой, например, $f_0=10$ МГц поступает на блок опорных частот 2, где он преобразуется в последовательность синхроимпульсов частотой, например, $f_1=300$ МГц. Сигнал f_1 подается на один из входов формирователя стробов 8, а на другой вход формирователя стробов 8 с центрального процессора 9 подаются, последовательно во времени, три импульса А, Б и В длительностью, например, 1,5 нс. Передний фронт первого импульса соответствует команде "Пуск", второго - команде на начало, а третьего - команде на окончание манипуляций с частотой. Формирователь стробов 8 имеет два выхода I и II, первый из которых соединен с входом аккумулятора фазы 4 первого из цифровых вычислительных синтезаторов 3, а второй - с входом аккумулятора фазы 4 второго из цифровых вычислительных синтезаторов 3. При совпадении во времени с фронтом первого из синхроимпульсов с импульсом А формирователь стробов 8 генерирует на каждом из двух своих выходов I и II одиночные импульсы, которые подаются на входы аккумуляторов фазы 4 каждого из цифровых вычислительных синтезаторов 3. Для импульсов Б и В формирователь стробов 8 генерирует выходной импульс только на выходе I, т.е. на выходе, который соединен с входом аккумулятора фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3 сдвигаемого по частоте сигнала. Генерирование выходных импульсов формирователя стробов 8 в этих случаях происходит также при совпадении во времени фронта первого из синхроимпульсов с импульсом Б и импульсом В. Выходные импульсы формирователя стробов 8 имеют и длительность, например, 1,5 нс. Импульсы с формирователя стробов 8 дают команду на запись установочных параметров по регистру "приращения фазы" и регистру "задания начальной фазы" аккумуляторов фазы 4 цифровых вычислительных синтезаторов 3.

В каждом такте опорной частоты f_1 аккумулятор фазы 4 увеличивает свое значение R на величину M - кода "приращения фазы", записанную в ячейку памяти аккумулятора фазы 4: $R_i=R_{i-1}+M$. В результате, значение аккумулятора фазы 4 линейно увеличивается со временем. Аккумулятор фазы 4 работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю 2^N , где N - разрядность аккумулятора фазы 4 по входу регистра "приращения фазы". Частота переполнения аккумулятора фазы 4 равна частоте сигнала на выходе цифрового вычислительного синтезатора 3 - F. Она определяется формулой:

$$F=M f_1/2^N [\text{Гц}].$$

Минимальный шаг возможной перестройки F - частоты сигнала на выходах 3а и 3б цифровых вычислительных синтезаторов 3 - зависит не от значения F , а от разрядности цифрового вычислительного синтезатора 3, по входу регистра "приращения фазы" и от тактовой частоты f_1 . Минимальный шаг возможной перестройки частоты сигнала

равен $\delta F = f_1 / 2^N$. Например, если разрядность цифрового вычислительного синтезатора 3 (по входу регистра "приращения фазы") равна 48 бит, а тактовая частота $f_1 = 300$ МГц, то частотное разрешение δF будет порядка $1,0685 \cdot 10^{-6}$ Гц.

Минимальный шаг перестройки частоты сигнала на выходах 3а и 3б цифровых вычислительных синтезаторов 3 определяет нижнюю границу диапазона рабочих частот устройства для задания фазового сдвига.

Максимально возможное значение рабочей частоты устройства для задания фазового сдвига зависит от f_1 - частоты опорных синхроимпульсов подаваемых с выхода блока опорных частот 2 на входы "синхроимпульс" цифровых вычислительных синтезаторов 3. Например, при $f_1 = 300$ МГц верхнее, граничное значение рабочей частоты устройства для задания фазового сдвига будет порядка 100 МГц.

В исходном состоянии - до подачи команды "Пуск", код "приращение фазы" - M и код "начальной фазы" K в аккумуляторах фазы 4 обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3 равны нулю ($M=K=0$).

При подаче команды "Пуск" на входы обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3 поступают: 1) импульс A - с выходов I и II формирователя стробов 8; 2) одно управляющее слово в виде битов на входы регистра "приращения фазы" и другое управляющее слово в виде битов на входы регистра "задания начальной фазы" - с центрального процессора 9. В аккумуляторах фазы 4 обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3 устанавливается одинаковое значение кода "приращения фазы" - $M=M_0$, равное наибольшему целому числу $2^N F_0 / f_1$, и одинаковый код "начальной фазы" $K=K_0$. Здесь F_0 - значение задаваемой частоты сигналов на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига. Значение K_0 может быть произвольным. В частном случае, принятом в дальнейшем по умолчанию, $K_0=0$.

При подаче команды "на начало манипуляций с частотой" на входы аккумулятора фазы 4 ведомого цифрового вычислительного синтезатора 3.2 поступают: 1) импульс B - с выхода I формирователя стробов 8; 2) новое управляющее слово в виде битов на входы регистра "приращения фазы" - с центрального процессора 9. В аккумуляторе фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3.2, сдвигаемого по частоте сигнала, устанавливается новое значение кода "приращения фазы" - $M=M_1$, равное наибольшему целому числу $2^N F_1 / F_1$, где F_1 - новое значение частоты сигнала на выходе 3б устройства для задания фазового сдвига. Значение K_0 (в обоих цифровых вычислительных синтезаторах 3) и значение кода "приращения фазы" - M (в опорном цифровом вычислительном синтезаторе 3.1) не изменяются.

При подаче команды "на окончание манипуляций с частотой" на входы ведомого цифрового вычислительного синтезатора 3.2 поступают: 1) импульс B - с выхода I формирователя стробов 8; 2) новое управляющее слово в виде битов на входы регистра "приращения фазы" - с центрального процессора 9. В аккумуляторе фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3, сдвигаемого по частоте сигнала, устанавливается код "приращения фазы" - $M=M_0$. Значение K_0 (в обоих цифровых вычислительных

синтезаторах 3) и значение кода "приращения фазы" - М (в опорном цифровом вычислительном синтезаторе 3.1) не изменяются.

Вычисленное аккумулятором фазы 4 в каждом такте значение фазы преобразуется в каждом такте преобразователем фаза-амплитуда 5 в значение амплитуды по закону $\sin(x_i)$, где $x_i = 2\pi \cdot 2_i^R / 2^N$ [рад] = $360 \cdot 2_i^R / 2^N$ - нормированное значение фазы. В принципе, данное преобразование "фаза-амплитуда" может быть произвольным и зависит от приложения. Результат вычисления в виде цифрового сигнала подается на вход цифроаналогового преобразователя 6. Работа цифро-аналогового преобразователя 6 тактируется синхроимпульсами частотой f_1 . На выходе цифроаналогового преобразователя 6 формируется сложный сигнал, состоящий из «ступенек». Этот сигнал фильтруется аналоговым фильтром нижних частот 7, и на его выходе, являющимся выходом цифрового вычислительного синтезатора 3, получается синусоидальный сигнал.

Возможен еще один режим работы устройства для задания фазового сдвига, позволяющий уменьшить время установки требуемого фазового сдвига. Для реализации этого режима (до манипуляции с частотой) на вход формирователя стробов 8 с центрального процессора 9 подается команда "установка фазы" - дополнительный импульс длительностью, например, 1,5 нс, а на вход регистра «задания начальной фазы» аккумулятора фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3.2 - новое управляющее слово в виде битов. В аккумуляторе фазы 4 цифрового вычислительного синтезатора 3.2 устанавливается новое значение кода "начальной фазы" $K=K_1$. Значение кода "приращения фазы" - М (в обоих цифровых вычислительных синтезаторах 3) и значение K_0 (в опорном цифровом вычислительном синтезаторе 3.1) не изменяются. В результате на выходах устройства для задания фазового сдвига формируется сдвиг фаз между двумя монохроматическими гармоническими сигналами с фиксированной частотой, пропорциональный разности начальных фаз по опорному и изменяемому каналам:

$$\delta\Phi = 2\pi \left(2_1^K - 2_0^K \right) / 2_1^N \text{ [рад]} = 360 \cdot \left(2_1^K - 2_0^K \right) / 2_1^N \text{ [град]}, \text{ где } N_1 - \text{разрядности цифрового}$$

вычислительного синтезатора 3, по входу регистра "задания начальной фазы".

При всех манипуляциях с частотой и фазой выходных сигналов устройства для задания фазового сдвига значение f_1 - частоты опорных синхроимпульсов, подаваемых с выхода блока опорных частот 2 на входы "синхроимпульс" цифровых вычислительных синтезаторов 3 и вход "синхроимпульс" формирователя стробов 8, остается неизменным.

Сущность предлагаемого способа поясняется следующим образом.

В исходном состоянии - до подачи команды "Пуск", код "приращение фазы" - М и код "начальной фазы" К в аккумуляторах фазы 4 обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3 равны нулю ($M=K=0$). Следовательно, на выходах устройства для задания фазового сдвига будут сигналы постоянной (не зависящие от времени) амплитуды. При полной идентичности цифровых вычислительных синтезаторов 3.1 и 3.2 амплитуды этих сигналов должны быть одинаковы.

При подаче команды "Пуск" в аккумуляторах фазы 4 обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3 одновременно устанавливается одинаковое значение кода "приращения фазы" - $M=M_0$, равное наибольшему целому числу $2^N F_0 / f_1$, и одинаковый код "начальной фазы" $K=K_0$. Здесь F_0 - значение задаваемой частоты сигналов на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига. Значение K_0 может быть произвольным. Момент времени прихода первого синхроимпульса на

аккумуляторах фазы 4 после установки кода "приращения фазы" и одинакового кода "начальной фазы" примем за начало отсчета ($t=0$, t - время). На выходе 3а устройства для задания фазового сдвига при $t>0$ будет синусоидальный сигнал с частотой

$F_{01}=f_1 M_0/2^N$ и текущей фазой $\Phi_1=2\pi F_{01}t+\Phi_{01}$, где Φ_{01} - начальная фаза, определяемая кодом "начальной фазы" $K=K_0$ (при $K_0=0$ - $\Phi_{01}=0$).

На выходе 3б устройства для задания фазового сдвига при $t>0$ будет синусоидальный сигнал с частотой $F_{02}=f_1 M_0/2^N$ и текущей фазой $\Phi_2=2\pi F_{02}t+\Phi_{02}$, где Φ_{02} - начальная фаза, определяемая кодом "начальной фазы" $K=K_0$. Поскольку значения кодов "приращения фазы" и значения кодов "начальной фазы" в аккумуляторах фазы 4 обоих цифровых вычислительных синтезаторов 3.1 и 3.2 одинаковы, и они установлены одновременно, то $F_{01}=F_{02}=F_0$ и $\Phi_{01}=\Phi_{02}=\Phi_0$. Следовательно, фазовый сдвиг между сигналами на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига равен $\delta\Phi=\Phi_1-\Phi_2=2\pi F_{01}t+\Phi_{01}-2\pi F_{02}t-\Phi_{02}=0$. Иными словами, сигналы синфазные.

При подаче команды "на начало манипуляций с частотой" в аккумуляторе фазы 4 ведомого цифрового вычислительного синтезатора 3.2 устанавливается новое значение кода "приращения фазы" - $M=M_1$, равное наибольшему целому числу $2^N F_1/f_1$, где F_1 - новое значение частоты сигнала на выходе 3б устройства для задания фазового сдвига. Значение K_0 (в обоих цифровых вычислительных синтезаторах 3) и значение кода "приращения фазы" - M (в опорном цифровом вычислительном синтезаторе 3.1) не изменяются. Момент времени прихода первого синхроимпульса на аккумулятор фазы 4 после установки нового кода "приращения фазы" обозначим t_1 . На выходе 3а устройства для задания фазового сдвига при $t>t_1$ будет синусоидальный сигнал с той же частотой F_0 , что и при $0<t<t_1$ и текущей фазой $\Phi_1=2\pi F_0t+\Phi_0$. На выходе 3б устройства для задания фазового сдвига при $t>t_1$ будет синусоидальный сигнал с частотой $F_1=f_1 M_1/2^N \neq F_0$ и текущей фазой $\Phi_2=2\pi F_0t_1+F_1(t-t_1)+\Phi_0$. Следовательно, фазовый сдвиг между сигналами на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига равен $\delta\Phi=\Phi_1-\Phi_2=2\pi=(F_0-F_1)(t-t_1)$. При увеличении времени величина фазового сдвига прямо пропорционально возрастает с коэффициентом пропорциональности, равным разности между предыдущим и новым значениями частоты.

При подаче команды "на окончание манипуляций с частотой" в аккумуляторе фазы 4 ведомого цифрового вычислительного синтезатора 3.2 устанавливается новое значение кода "приращения фазы", равное предыдущему его значению - $M=M_0$. Значение K_0 (в обоих цифровых вычислительных синтезаторах 3) и значение кода "приращения фазы" - M (в опорном цифровом вычислительном синтезаторе 3.1) не изменяются. Момент времени прихода первого синхроимпульса на аккумулятор фазы 4 после установки нового кода "приращения фазы" обозначим t_2 . Частота синусоидального сигнала на выходе 3а устройства для задания фазового сдвига при $t>t_2$ не изменится. Его текущая фаза будет определяться соотношением $\Phi_1=2\pi F_0t+\Phi_0$. Частота синусоидального сигнала на выходе 3б устройства для задания фазового сдвига при $t>t_2$ изменится и станет равной F_0 . Текущая фаза этого сигнала определяется соотношением $\Phi_2=2\pi(F_0t_1+F_1(t_2-t_1)+F_1(t-t_2))+\Phi_0$. Следовательно, фазовый сдвиг между сигналами на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига равен $\delta\Phi=\Phi_1-\Phi_2=2\pi(F_0-F_1)(t_2-t_1)=2\pi(F_0-F_1)\Delta t=$

$2\pi\Delta F\Delta t$. Величина фазового сдвига постоянна, не зависит от частоты несущего сигнала F_0 и определяется произведением вариации частоты на время ее манипуляции.

Минимальная величина фазового сдвига определяется минимально возможным шагом перестройки частоты сигнала на выходах 3а и 3б цифровых вычислительных синтезаторов 3 и минимально возможным контролируемым временным промежутком, в течение которого происходит манипуляция с частотой. Например, при частотном разрешении δF порядка $1,0685 \cdot 10^{-6}$ Гц (разрядность цифрового вычислительного синтезатора 3 по входу регистра "приращения фазы" 48 бит, тактовая частота $f_1=300$ МГц) и дискретности времени манипуляции порядка 35 нс (временной интервал с десятью синхроимпульсами) получим $\delta\Phi_{\min} \approx 2,35 \cdot 10^{-13}$ рад или $1,35 \cdot 10^{-11}$ град, а при дискретности времени манипуляции порядка 0,001 с (временной интервал примерно с 300000 синхроимпульсами) - $\delta\Phi_{\min} \approx 6,70 \cdot 10^{-9}$ рад или $3,84 \cdot 10^{-7}$ град.

Максимальная величина фазового сдвига формально ничем не ограничена, т.к. формально неограниченно время манипуляции с частотой.

Погрешность установки фазового сдвига в предлагаемом способе может быть рассчитана по формуле: $D_\Phi = 2\pi\delta F D_t$ [рад] = $360\delta F D_t$ [град], где D_t - погрешность отсчета временного интервала Δt . Эта погрешность может быть уменьшена до величины порядка $5 \cdot 10^{-6}$ с. Следовательно, при частотном разрешении δF порядка $1,0685 \cdot 10$ Гц абсолютная погрешность задания фазы будет порядка $D_\Phi \approx 3 \cdot 10^{-13}$ [рад] = $1,8 \cdot 10^{-11}$ [град].

Сущность предлагаемых способов по п.2-7 формулы поясним примерами для конкретной ситуации: задаваемый фазовый сдвиг - $\delta\Phi_0 = 10^\circ \approx 0,1745329251$ [рад] (числовое значение задаваемого и получаемого фазового сдвига будем приводить с точностью до десятого знака после запятой); частотное разрешение - $\delta F = 1,0685 \cdot 10^{-6}$ Гц; дискретность отсчета времени - $\delta t = 1$ мс = $1,0 \cdot 10^{-3}$ с. Обозначим через $\delta\Phi_1 = 2\pi\Delta F\Delta t$ - устанавливаемый фазовый сдвиг; $\Delta\Phi = |\delta\Phi_1 - \delta\Phi_0|$ - погрешность установки фазового сдвига; $\Delta\Phi_{\min} = |\delta\Phi_1 - \delta\Phi_0 - 2\pi s|$; m - коэффициент кратности устанавливаемого сдвига частоты ΔF к частотному разрешению δF : $\Delta F = m\delta F$; l - коэффициент кратности устанавливаемого времени манипуляции частотой Δt к дискретности отсчета времени δt : $\Delta t = l\delta t$; s - коэффициент кратности устанавливаемого фазового сдвига $\delta\Phi_1$ к 2π : $s = [\delta\Phi_1/2\pi]$. Здесь $[x]$ - целая часть числа x .

По п.2 формулы при $m=5$ получаем $l = [\delta\Phi_0/(2\pi m\delta F\delta t)] = 5212499$, $\delta\Phi_1 = 2\pi\Delta F\Delta t = 2\pi m\delta F l\delta t = 0,1745329396$ [рад], $\Delta\Phi = |\delta\Phi_1 - \delta\Phi_0| = 1,44 \cdot 10^{-8}$ [рад] и $\Delta t \approx 5212,5$ с.

По п.3 формулы при $l=1000$ получаем $m = [\delta\Phi_0/(2\pi m\delta F\delta t)] = 26062$, $\delta\Phi_1 = 2\pi\Delta F\Delta t = 2\pi m\delta F l\delta t = 0,1745295912$ [рад], $\Delta\Phi = |\delta\Phi_1 - \delta\Phi_0| = 3,33 \cdot 10^{-6}$ [рад] и $\Delta t \approx 1$ с.

По п.4 формулы: минимум разности величины требуемого фазового сдвига и величины получаемого фазового сдвига может реализовываться, например, при $m=77$ и $l=338474$ и при $m=913$ и $l=28546$. В первом случае $\Delta t \approx 338,5$ с, а во втором - $\Delta t \approx 28,5$ с. Величины устанавливаемого фазового сдвига и погрешность установки фазового сдвига в обоих случаях одинакова - $\delta\Phi_1 = 0,17453292624$ [рад] и $\Delta\Phi = 1,05 \cdot 10^{-9}$ [рад].

По п.5 формулы: при $m=5$ получаем, что один из возможных минимумов $\Delta\Phi_{\min}$

реализуется при $s=14$ и $l=2632312283$. В этом случае $\delta\Phi_1=0,1745329184$ [рад], $\Delta\Phi=6,75\cdot 10^{-9}$ [рад] и $\Delta t\approx 2632312$ с.

По п.6 формулы: при $l=1000$ получаем, что один из возможных минимумов $\Delta\Phi_{\min}$

5 реализуется при $s=14$ и $m=13161561$. В этом случае $\delta\Phi_1=0,1745301728$ [рад], $\Delta\Phi=2,75\cdot 10^{-6}$ [рад] и $\Delta t\approx 1$ с.

По п.7 формулы: один из возможных минимумов $\Delta\Phi_{\min}$ реализуется при $s=14$. Тогда, например, при $m=77$ и $l=170929369$ и при $m=13161561411$ и $l=28546$. В первом случае

10 $\Delta t\approx 170929,4$ с, $\delta\Phi_1=0,1745324229$ [рад] и $\Delta\Phi=5,02\cdot 10^{-7}$ [рад]. Во втором - $\Delta t\approx 0,001$ с,

$\delta\Phi_1=0,1745329251$ [рад] и $\Delta\Phi=5,04\cdot 10^{-11}$ [рад].

Погрешность установки фазового сдвига по п.2-7 формулы может быть рассчитана так же, как и по п.1 формулы.

15 Сущность предлагаемого способа по п.8 формулы поясняется следующим образом.

При подаче команды "установка фазы" в аккумуляторе фазы 4 ведомого цифрового вычислительного синтезатора 3.2 устанавливается новое значение кода "начальной фазы" $K=K_1$. Значение кода "приращения фазы" - M в обоих цифровых вычислительных синтезаторах 3 и значение кода "начальной фазы" - K в опорном цифровом

20 вычислительном синтезаторе 3.1 не изменяются. Момент времени прихода первого синхроимпульса на аккумулятор фазы 4 после установки нового кода "начальной фазы" обозначим t_1 . На выходе 3а устройства для задания фазового сдвига при $t>t_1$ будет

синусоидальный сигнал с той же частотой F_0 , что и при $0<t<t_1$ и текущей фазой $\Phi_1=2\pi F_0$

25 $t+\Phi_{01}$, где Φ_{01} - начальная фаза, определяемая кодом "начальной фазы" $K=K_0$ (при $K_0=0-\Phi_{01}=0$). На выходе 3б устройства для задания фазового сдвига при $t>t_1$ будет

синусоидальный сигнал с частотой F_0 и текущей фазой $\Phi_2=2\pi F_0 t+\Phi_{02}$, где Φ_{02} -

начальная фаза, определяемая кодом "начальной фазы" - $K=K_1$. Следовательно, фазовый

сдвиг между сигналами на выходах 3а и 3б устройства для задания фазового сдвига

30 равен $\delta\Phi=\Phi_1-\Phi_2=2\pi F_0 t+\Phi_{01}-2\pi F_0 t-\Phi_{02}=\Phi_{01}-\Phi_{02}$. При увеличении времени величина фазового сдвига не изменяется.

Минимальный шаг возможной перестройки $\delta\phi$ начальной фазы сигналов на выходах 3а и 3б цифровых вычислительных синтезаторов 3 зависит от N_1 - разрядности цифрового

35 вычислительного синтезатора 3, по входу регистра "задания начальной фазы" и не зависит от тактовой частоты f_1 . Минимальный шаг возможной перестройки начальной

фазы сигнала равен $\delta\phi = 2\pi / 2_1^N$ [рад] = $360 / 2_1^N$ [град]. Такое же значение имеет

потенциально возможное минимальное фазовое разрешение $\delta\phi$ при манипуляциях с

40 частотой. В этом смысле эти два способа задания фазового сдвига (манипуляции

начальной фазой и манипуляции частотой) равнозначны. Однако реально существующие

цифровые вычислительные синтезаторы имеют по входу регистра "задания начальной фазы" значительно меньшую разрядность, чем по входу регистра "приращения фазы".

Например, для одного из современных цифровых вычислительных синтезаторов AD9852 разрядность по входу регистра "задания начальной фазы" равна 14 бит, а разрядность

45 по входу регистра "приращения фазы" - 48 бит. Следовательно, при манипуляции

начальной фазой максимально возможное фазовое разрешение $\delta\phi$ будет порядка

$3,835\cdot 10^{-4}$ рад $\approx 0,022$ град, а при манипуляциях с частотой с дискретностью по времени

порядка 0,001 с максимально возможное фазовое разрешение $\delta\Phi_{\text{мин}}$ будет порядка $6,70 \cdot 10^{-9}$ рад или $3,84 \cdot 10^{-7}$ град.

Погрешность установки фазового сдвига по п.9 формулы может быть рассчитана так же, как и по п.1 формулы.

Предлагаемый способ по сравнению с известным, позволяет уменьшить погрешность и дискрет сдвига фаз за счет манипуляций с частотой непосредственно при цифровом синтезе сигналов, которую осуществляют соответствующим изменением управляющего слова в виде битов на входе регистра "приращения фазы" цифрового вычислительного синтезатора на время манипуляции частотой. Такой способ позволяет обеспечить постоянство абсолютной погрешности, ее независимости от величины задаваемого фазового сдвига и частоты сигналов.

Источники информации

1. Патент РФ №2141165, кл. H03L 7/081, H03H 7/20, 1999.

2. Авторское свидетельство СССР №1337818, кл. G01R 25/04, 1987.

Формула изобретения

1. Способ дискретного задания фазового сдвига между двумя монохроматическими гармоническими изначально синхронными сигналами, формируемыми непосредственным цифровым синтезом, основанный на линейности зависимости текущей фазы периодического сигнала от времени, получаемого в результате сдвига частоты сигнала, отличающийся тем, что с целью расширения диапазона рабочих частот, повышения точности задания угла фазового сдвига и уменьшения дискретности его воспроизведения манипуляции с частотой производятся непосредственно при цифровом синтезе сдвигаемого по частоте сигнала, которую осуществляют соответствующим изменением управляющего слова в виде битов на входе регистра "приращения фазы" цифрового вычислительного синтезатора на время манипуляции частотой, величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала и длительность интервала времени, на которое он производится, могут меняться и контролируются, а значение фазового сдвига определяется как произведение величины сдвига частоты и длительности интервала времени.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала выбирается кратной частотному разрешению цифрового вычислительного синтезатора, а длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, определяется как отношение требуемой величины фазового сдвига к величине сдвига частоты с округлением до ближайшей, кратной разрешению отсчета времени величины.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, выбирается кратной разрешению отсчета времени, а величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала определяется как отношение величины требуемого фазового сдвига к длительности интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой с округлением до ближайшей, кратной частотному разрешению цифрового вычислительного синтезатора величины.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала и длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, выбираются из условия минимума разности величины требуемого фазового сдвига и величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным частотным разрешением цифрового вычислительного синтезатора и конечным разрешением отсчета времени с округлением до величин ближайших кратным частотному разрешению

цифрового вычислительного синтезатора и разрешению отсчета времени, соответственно.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала выбирается кратной частотному разрешению цифрового вычислительного синтезатора, а длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, определяется из условия минимума абсолютной величины разности требуемого фазового сдвига и разности величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным разрешением отсчета времени, и произведения числа 2π на целую часть величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным разрешением отсчета времени, к числу 2π .

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, выбирается кратной разрешению отсчета времени, а величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала определяется из условия минимума абсолютной величины разности требуемого фазового сдвига и разности величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным частотным разрешением цифрового вычислительного синтезатора, и произведения числа 2π на целую часть величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным частотным разрешением цифрового вычислительного синтезатора, к числу 2π .

7. Способ по п.1, отличающийся тем, что величина сдвига частоты сдвигаемого сигнала и длительность интервала времени, за которое производится манипуляция с частотой, выбираются из условия минимума абсолютной величины разности требуемого фазового сдвига и разности величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным частотным разрешением цифрового вычислительного синтезатора и конечным разрешением отсчета времени, и произведения числа 2π на целую часть отношения величины получаемого фазового сдвига, обусловленного конечным частотным разрешением цифрового вычислительного синтезатора и конечным разрешением отсчета времени, к числу 2π .

8. Способ по одному из пп.1-8, отличающийся тем, что с целью уменьшения времени установки требуемого фазового сдвига до манипуляции с частотой, на вход регистра «задания начальной фазы» цифрового вычислительного синтезатора подается управляющее слово в виде битов, соответствующее значению фазового сдвига, максимально близкому значению задаваемого фазового сдвига.

9. Устройство для дискретного задания фазового сдвига между двумя монохроматическими гармоническими сигналами, содержащее последовательно соединенные: опорный генератор; блок опорных частот, подключенный к двум идентичным каналам, отличающееся тем, что с целью повышения точности задания угла фазового сдвига и уменьшения дискретности его воспроизведения, в него введены формирователь стробов и центральный процессор, а каждый из идентичных каналов выполнен на основе цифрового вычислительного синтезатора, состоящего из последовательно соединенных: аккумулятора фазы; преобразователя фаза-амплитуда; цифроаналогового преобразователя и фильтра нижних частот, при этом выход блока опорных частот подключен к одному из входов формирователя стробов, к другому входу формирователя стробов подключен один из выходов центрального процессора, другие выходы центрального процессора подключены к входам регистра "приращения фазы" и регистра "задания начальной фазы" аккумуляторов фазы цифровых вычислительных синтезаторов, выходы формирователя стробов подключены к входам "Пуск" аккумуляторов фазы цифровых вычислительных синтезаторов.