

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040762**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.07.25

(51) Int. Cl. **H03D 13/00** (2006.01)
H03L 7/00 (2006.01)

(21) Номер заявки
201900555

(22) Дата подачи заявки
2019.12.13

(54) **УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА КЛАССИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ**

(31) **2018145597**

(56) **RU-C1-2625557**

(32) **2018.12.20**

RU-U1-171585

(33) **RU**

RU-C1-2449463

(43) **2020.08.31**

US-B1-6396881

US-B1-6657466

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

WO-A1-1998025368

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "САНКТ-
ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (СПБГУ) (RU)**

(72) Изобретатель:

**Кудряшова Елена Владимировна,
Кузнецов Николай Владимирович,
Кузнецова Ольга Александровна,
Лобачев Михаил Юрьевич, Мокаев
Тимур Назирович, Юлдашев Марат
Владимирович, Юлдашев Ренат
Владимирович (RU)**

(74) Представитель:

**Матвеев А.А., Матвеева Т.И., Леонов
И.Ф. (RU)**

(57) Изобретение относится к области электротехники, в частности к радиоэлектронике и компьютерным архитектурам, может использоваться в приеме-передающих устройствах и технике связи и управления, радиоавтоматике, системах авторегулирования, в частности, при проектировании различных типов систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), отличающееся возможностью определять оптимальные параметры для достижения синхронного режима в пределах одного биения и стабильной работы систем ФАПЧ, что способствует повышению помехоустойчивости и улучшению фильтрующих свойств системы. Заявленное изобретение позволяет эффективно определять оптимальные параметры систем ФАПЧ, позволяющие достигать синхронизма внутри одного биения, определять границы рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки и моделировать работу систем ФАПЧ, проектировать более сложные системы фазовой автоподстройки, применяемые при беспроводной передаче информации, а также в многоядерных и многопроцессорных компьютерных архитектурах.

B1

040762

040762

B1

Изобретение относится к области электротехники, в частности к радиоэлектронике и компьютерным архитектурам, может использоваться в приеме-передающих устройствах и технике связи и управления, радиоавтоматике, системах авторегулирования, в частности, при проектировании различных типов систем фазовой автоподстройки частоты (далее ФАПЧ), отличающееся возможностью определять оптимальные параметры для достижения синхронного режима в пределах одного биения и стабильной работы систем ФАПЧ, что способствует повышению помехоустойчивости и улучшению фильтрующих свойств системы.

Известно, что тестирование реальной модели является трудоемким процессом и не может гарантировать правильность работы системы фазовой автоподстройки при всевозможных значениях начальных данных и параметров ее компонент, таких как начальная разность фаз эталонного и подстраиваемого генераторов, начальное состояние фильтра нижних частот, поэтому такой способ достаточно редко применяется на практике.

Известно, что анализ моделей систем фазовой автоподстройки в пространстве сигналов является сложной задачей, так как данные модели описываются неавтономными нелинейными дифференциальными уравнениями [1].

Известно, что наиболее распространенным способом, используемым при проектировании и анализа систем ФАПЧ, является способ моделирования и анализ созданных моделей фазовой автоподстройки в пространстве фаз сигналов [2, 3]. В частности, модели ФАПЧ в пространстве фаз сигналов используются для нахождения оценок диапазона разностей частот эталонного и подстраиваемого генераторов, соответствующему режиму, при котором синхронизация достигается внутри одного биения как при начале работы системы ФАПЧ, так и при мгновенном переключении частоты эталонного генератора. Такой диапазон называют полосой захвата без проскальзывания [4-6]. Несмотря на то что нахождение таких диапазонов является сложным и трудоемким, оценки допустимого отклонения частоты существуют [7]. Однако из-за применения упрощенных фильтров нижних частот при проектировании таких систем соответствующие системы обладают недостаточно высокой помехоустойчивостью.

Известно устройство фазовой автоподстройки частоты [8], суть которого в повышении устойчивости, определяющей полосу захвата частоты, при сохранении высокой точности фазовой синхронизации. Однако известное устройство является недостаточно стабильным за счет того, что при его работе допускается фазовая синхронизация с биениями, а также определение полосы захвата без проскальзывания с помощью известного устройства является сложной задачей.

Известна схема [9], работа которой основана на формировании двух управляющих сигналов с помощью фазового детектора, который получает два высокостабильных по частоте сигнала, генерируемых эталонным и подстраиваемым генератором, и блока измерения разности частот, подключенного к выходу фазового детектора и генерирующего сигнал, соответствующий разности частот. Однако определение полосы захвата без проскальзывания с помощью известного устройства является трудоемким и обладает недостаточной точностью.

Известны способ для определения рабочих параметров фазовой автоподстройки частоты генератора и устройство для его реализации [10], основанные на задании дополнительного сигнала в зависимости от двух заданных высокостабильных по частоте колебания эталонного и подстраиваемого сигнала. Дополнительный сигнал используется для определения рабочих параметров системы фазовой синхронизации и снижает трудоемкость их определения. Недостатком известного способа и устройства является то, что биения в процессе синхронизации системы выявляются опытным путем, и такое выявление является трудоемким. Помимо этого, известные способ и устройство являются недостаточно информативными для определения рабочего диапазона, при котором фазовая синхронизация достигается внутри одного биения.

Известны способ для определения границ рабочего диапазона импульсного генератора систем фазовой синхронизации и устройство для его реализации [11], наиболее близкие к заявленной группе изобретений, принятые в качестве прототипа для заявленного изобретения. Сущность известного способа состоит в том, что задают два высокостабильных по частоте колебания прямоугольных сигнала, один из которых выбирают эталонным, а второй подстраиваемым, причем диапазон частот первого и второго сигналов выбирают от 20 кГц до 20 ГГц, задают первый и второй коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот, после чего по соотношению эталонного и подстраиваемого сигналов задают дополнительный сигнал, который с помощью фильтра нижних частот подвергают фильтрации, с помощью усилителя постоянного тока увеличивают его амплитуду, и дополнительный сигнал используют в качестве управляющего сигнала, причем допустимое отклонение частоты подстраиваемого сигнала от эталонного задается по соответствующим формулам, выбор которых зависит от функции сравнения.

Недостатками данного прототипа являются недостаточная помехоустойчивость в силу применения упрощенных фильтров нижних частот, а также невозможность применения известного способа к системам с эталонным и подстраиваемым сигналами гармонической формы.

Технический результат, достигаемый новым решением, является общим для всей группы объектов заявленного изобретения (способу для определения границ рабочего диапазона классических систем фазовой автоподстройки и устройству для его реализации), и состоит в повышении устойчивости относи-

тельно помех и шумов за счет проектирования фильтров нижних частот в более широком диапазоне параметров.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе для определения границ рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки, в котором задают два высокостабильных по частоте колебания сигнала, один из которых выбирают эталонным, а второй выбирают подстраиваемым, причем диапазон их частот выбирают от 20 кГц до 20 ГГц, после чего по соотношению этих двух сигналов задают дополнительный сигнал, который с помощью фильтра нижних частот подвергают фильтрации, и дополнительный сигнал используют в качестве управляющего сигнала, в соответствии с заявленным изобретением формы эталонного и подстраиваемого сигналов выбирают синусоидальной и косинусоидальной соответственно, а в качестве фильтра нижних частот выбирают фильтр нижних частот второго порядка с передаточной функцией вида:

$$H(s) = \frac{bcs+c}{s(s+a)} + c,$$

где $H(s)$ - передаточная функция фильтра нижних частот,

s - комплексная переменная,

$a > 0$, $b > 0$ и $c > 0$ - первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот, удовлетворяющие соотношениям:

$$a(a+b) > 1, ab \neq 1,$$

а частоту подстраиваемого сигнала выбирают не более чем на ω_1 от частоты эталонного сигнала, причем допустимое отклонение частоты ω_1 задается по соотношению:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{Kc}{a}},$$

где K - коэффициент усиления усилителя постоянного тока.

Указанный технический результат достигается также новым устройством для определения границ рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки, выполненном в корпусе, содержащем эталонный генератор высокостабильного по частоте колебания, выход которого подключен к первому входу фазового детектора, который выполнен в виде перемножителя двух сигналов, выход фазового детектора подключен к первому входу фильтра нижних частот, выход фильтра нижних частот подключен к первому входу усилителя постоянного тока, выход усилителя постоянного тока подключен к управляющему входу подстраиваемого генератора высокостабильного по частоте колебания, выход подстраиваемого генератора подключен ко второму входу фазового детектора, блок определения границ рабочего диапазона, выполненного в виде арифметического контроллера с обеспечением точности вычислений не менее четырех знаков после запятой, выход которого подключен к регистратору, который фиксирует границы рабочего диапазона системы фазовой автоподстройки частоты, блок задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока, первый выход которого подключен ко второму входу усилителя постоянного тока, второй выход блока задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока подключен к первому входу блока определения границ рабочего диапазона, в котором, в соответствии с заявленным изобретением, дополнительно установлен блок задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен ко второму входу фильтра нижних частот, а второй выход блока задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен ко второму входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен к третьему входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к третьему входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен к четвертому входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к четвертому входу блока определения границ рабочего диапазона.

В основу заявленного изобретения поставлена техническая задача повышения точности, достоверности и стабильности работы системы ФАПЧ, снижении трудоемкости определения рабочего диапазона при проектировании и тестировании системы фазовой автоподстройки.

Сущность заявленного способа поясняется фиг. 2, фиг. 3, на которых представлены функциональные зависимости эталонного и подстраиваемого сигналов от времени.

В заявленном способе один из двух высокостабильных по частоте сигналов выбирают эталонным с синусоидальной формой, который изображен на фиг. 2 как функция зависимости от времени, где " A_1 " - амплитуда, " ω_1 " - частота, а " $\frac{2\pi}{\omega_1}$ " - период сигнала. Второй из двух высокостабильных по частоте сигналов выбирают подстраиваемым с косинусоидальной формой, который изображен на фиг. 3 как функция зависимости от времени, где " A_2 " - амплитуда, " ω_2 " - частота, а " $\frac{2\pi}{\omega_2}$ " - период сигнала. Дополнительный сигнал выбирают равным половине суммы двух синусоидальных сигналов с частотами, равными " $\omega_1 - \omega_2$ "

и " $\omega_1 + \omega_2$ ", и амплитудами, равными " $\frac{1}{2} A_1 A_2$ ".

Заявленное изобретение было апробировано в лабораторных условиях Санкт-Петербургского государственного университета и результаты апробации приведены в виде конкретных примеров.

Примеры реализации способа для определения границ рабочего диапазона импульсного генератора систем фазовой синхронизации.

Пример 1.

Было проведено моделирование границ рабочего диапазона классической системы ФАПЧ с фазовым детектором типа перемножитель для двух высокостабильных по частоте сигналов, один из которых был принят эталонным с синусоидальной формой, а второй принят подстраиваемым с косинусоидальной формой. При этом первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот были заданы равными $a=0.1$, $b=11$, $c=1$ и коэффициент усиления усилителя постоянного тока был задан равным $K=10$. Частота эталонного сигнала была задана равной $\omega_1 = 30$ кГц. Допустимое отклонение частоты $\omega_1 = 10$ Гц было получено по оригинальной формуле, представленной в заявке. Отклонение частоты подстраиваемого сигнала от частоты эталонного сигнала было выбрано не превышающим допустимое отклонение частоты: $\omega_e^{free} = 10$ Гц. По результатам работы ФАПЧ полученная величина (частота подстраиваемого сигнала ω_2^{free} , равная 30,01 кГц) принадлежит рабочему диапазону ФАПЧ, для которого синхронизация происходит внутри одного биения. При этом при выборе отклонения частоты подстраиваемого сигнала от частоты эталонного сигнала ($\omega_e^{free} = 15$ Гц, превышающим допустимое отклонение частоты, выборе частоты подстраиваемого сигнала ($\omega_2^{free} = 30,015$ кГц и мгновенном изменении частоты эталонного сигнала ω_1 с 30 кГц до 30,03 кГц повторная синхронизация ФАПЧ происходила с биениями. При этом при выборе коэффициентов передаточной функции $a=0.1$, $b=1$, нарушающем требуемое неравенство $a(a+b) > 1$, выборе частоты подстраиваемого сигнала $\omega_2^{free} = 30,01$ кГц и мгновенном изменении частоты эталонного сигнала ω_1 с 30 кГц до 30,02 кГц синхронизация не наблюдалась.

Универсальность предлагаемого изобретения основана на реализации изменения допустимого отклонения частоты подстраиваемого сигнала от частоты эталонного сигнала, в зависимости от значений коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот и коэффициента усиления усилителя постоянного тока, по оригинальной формуле, представленной в заявке. Для этого, как видно из заявленного способа, определяется допустимое отклонение частоты и выбирается отклонение частоты подстраиваемого сигнала, не превышающее полученное допустимое значение.

Как показывают результаты исследования примера 1, использование единого способа вычисления допустимого отклонения частоты позволяет эффективно выбирать отклонения частоты подстраиваемого сигнала, гарантирующие достижение синхронного режима внутри одного биения, что существенно снижает трудоемкость.

Пример 2.

Заявленный способ поясняется также конкретным примером использования устройства для реализации этого способа, схема которого представлена на фиг. 1.

Устройство для определения границ рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки, выполненное в корпусе (1) и содержащее эталонный генератор высокостабильного по частоте колебания (2), выход которого подключен к первому входу фазового детектора (3), который выполнен в виде перемножителя двух сигналов, выход фазового детектора подключен к первому входу фильтра нижних частот (4), выход фильтра нижних частот подключен к первому входу усилителя постоянного тока (5), выход усилителя постоянного тока подключен к управляющему входу подстраиваемого генератора высокостабильного по частоте колебания (6), выход подстраиваемого генератора подключен ко второму входу фазового детектора, блок определения границ рабочего диапазона (11), выполненного в виде арифметического контроллера с обеспечением точности вычислений не менее четырех знаков после запятой, выход которого подключен к регистратору (12), который фиксирует границы рабочего диапазона системы фазовой автоподстройки частоты, блок задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока (10), первый выход которого подключен ко второму входу усилителя постоянного тока, второй выход блока задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока подключен к первому входу блока определения границ рабочего диапазона, устройство также содержит блок задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот (7), первый выход которого подключен ко второму входу фильтра нижних частот, а второй выход блока задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен ко второму входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот (8), первый выход которого подключен к третьему входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к третьему входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот (9), первый выход которого подключен к четвертому входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к четвертому входу блока определения границ рабочего диапазона.

Работа заявленного устройства осуществляется следующим образом. Фильтр нижних частот выполнен как фильтр нижних частот второго порядка с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{bcs+c}{s(s+a)} + c,$$

где $H(s)$ - передаточная функция фильтра нижних частот,
 s - комплексная переменная,

a , b и c - первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот.

Блок задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока генерирует значение коэффициента усиления K , а блоки задания первого, второго и третьего коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот генерируют первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции $a > 0$, $b > 0$ и $c > 0$, удовлетворяющие соотношениям: $a(a+b) > 1$, $ab \neq 1$.

Значения K , a , b и c поступают на входы блока определения границ рабочего диапазона, где производится определение допустимого отклонения частоты сигнала подстраиваемого генератора от частоты сигнала эталонного генератора ω_1 в соответствии со следующим соотношением:

$$\omega_l = \sqrt{\frac{Kc}{a}}.$$

Регистратор, подключенный к выходу блока определения границ рабочего диапазона, регистрирует допустимое отклонение частоты сигнала подстраиваемого генератора от частоты сигнала эталонного генератора.

Эталонный генератор высокостабильного по частоте колебания генерирует синусоидальный сигнал $f_1(t)$ в диапазоне 20 кГц - 20 ГГц с частотой ω_1 , а подстраиваемый генератора высокостабильного по частоте колебания генерирует косинусоидальный сигнал $f_2(t)$ в диапазоне 20 кГц - 20 ГГц с частотой ω_2^{free} , которую задают не более чем ω_1 от частоты ω_1 эталонного сигнала.

Сигналы эталонного и подстраиваемого генераторов поступают на вход фазового детектора, на выходе которого получают сигнал, удовлетворяющий следующему соотношению:

$$f(t) = f_1(t)f_2(t),$$

где $f(t)$ - выход фазового детектора.

Сигнал с выхода фазового детектора через первый вход фильтра нижних частот поступает на последовательно соединенные фильтр нижних частот, через первый вход усилителя постоянного тока, и через управляющий вход подстраиваемого генератора, чем и достигается технический результат, который состоит в упрощении и снижении трудоемкости определения рабочего диапазона классических систем ФАПЧ, повышении достоверности и точности за счет достижения режима синхронизма внутри одного биения, повышении информативности и стабильности работы системы.

Ниже приведен пример конкретной реализации устройства для определения границ рабочего диапазона ФАПЧ, подтверждающий работоспособность и достижение указанного выше технического результата заявленным способом.

Конкретный пример работы устройства для определения границ рабочего диапазона ФАПЧ состоит в следующем: эталонный и подстраиваемый генераторы генерируют сигналы, имеющие следующий вид:

$$f_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t),$$

$$f_2(t) = A_2 \cos(\omega_2(t)t),$$

где частота сигнала эталонного генератора $\omega_1 = 30$ кГц, частота сигнала подстраиваемого генератора $\omega_2(t)$ меняется в зависимости от управляющего входа, с помощью блока задания коэффициента усиления задают коэффициент усиления усилителя постоянного тока $K = 10$, и с помощью блоков задания первого, второго и третьего коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот задают $a = 0.1$, $b = 11$, $c = 1$. Заданное значение коэффициента усиления поступает на соответствующий вход усилителя постоянного тока, а заданные значения первого, второго и третьего коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот поступают на соответствующие входы фильтра нижних частот. Кроме того, заданные значения коэффициента усиления, первого, второго и третьего коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот поступают на соответствующие входы блока определения границ рабочего диапазона. Значение допустимого отклонения частоты ω_l вычисляется блоком определения границ рабочего диапазона в соответствии с заявленным соотношением, т.е. $\omega_l = 10$ Гц. Вычисленное значение допустимого отклонения частоты ω_l фиксируется регистратором.

Для достижения заявленного технического результата частоту сигнала подстраиваемого генератора задают не более чем ω_1 от частоты сигнала эталонного генератора, т.е. $\omega_2^{free} = 30,01$ кГц. Сигналы от эталонного и подстраиваемого генераторов поступают на соответствующие входы фазового детектора, выполненный как перемножитель, на выходе которого получают сигнал следующего вида:

$$f(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 (\sin((\omega_1 + \omega_2(t))t) + \sin((\omega_1 - \omega_2(t))t)).$$

Далее полученный сигнал проходит через последовательно соединенные фильтр нижних частот и усилитель постоянного тока, образуя управляющий сигнал, который поступает на управляющий вход подстраиваемого генератора.

Как показывают результаты исследования по примеру 2, использование единого способа вычисления границы рабочего диапазона позволяет задать частоту косинусоидального сигнала подстраиваемого генератора гарантированно внутри рабочего диапазона, что упрощает и снижает трудоемкость выбора отклонения частоты подстраиваемого сигнала, а так же за счет синхронизации ФАПЧ внутри одного биения достигается повышение достоверности и точности работы ФАПЧ.

Результаты проведенных исследований, изложенных в примерах 1 и 2, моделирующих конкретные условия реализации заявленного способа и устройства, показали работоспособность, достоверность и универсальность изобретения. Достижение технического результата стало возможным также за счет учета обнаруженной авторами универсальной зависимости допустимого отклонения частоты подстраиваемого сигнала от коэффициента усиления усилителя постоянного тока и коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот и возможности использования фильтра нижних частот второго порядка, что на апробировании многих моделей подтвердило универсальность заявленного способа и устойчивость работы устройства для всего допустимого диапазона рабочих параметров классической ФАПЧ с эталонным и подстраиваемым генераторами, генерирующими гармонические сигналы, по сравнению с известным способом-прототипом.

Технико-экономическая эффективность заявленного изобретения в целом состоит в оптимизации и снижении трудоемкости при проектировании ФАПЧ за счет определения границы рабочего диапазона, повышении стабильности (устойчивости) работы устройства за счет достижения ФАПЧ режима синхронизма внутри одного биения, расширении области рабочих параметров ФАПЧ за счет обнаруженной авторами универсальной зависимости допустимого отклонения частоты подстраиваемого сигнала от коэффициента усиления усилителя постоянного тока и коэффициентов передаточной функции фильтра нижних частот, и повышении достоверности (точности) работы системы за счет учета указанной закономерности.

Заявленное изобретение позволяет успешно решать задачи, связанные с определением рабочего диапазона классических ФАПЧ и моделированием работы ФАПЧ, с определением оптимальных параметров, соответствующих быстрому достижению синхронного режима и стабильной работы ФАПЧ, с построением более сложных ФАПЧ, применяющихся при беспроводной передаче информации, а также в многоядерных и многопроцессорных компьютерных архитектурах.

Используемые источники информации

1. Kudrewicz J., Wasowicz S. Equations of phase-locked loop. Dynamics on circle, torus and cylinder. World Scientific, 2007.
2. Aleksandrov, K. D., Kuznetsov, N. V., Leonov, G. A., Neittaanmäki, P., Yuldashev, M. V., Yuldashev, R. V. Computation of the lock-in ranges of phase-locked loops with PI filter. IFAC-PapersOnLine, 2016.
3. Kudryashova, E. V., Kuznetsov, N. V., Leonov, G. A., Yuldashev, M. V., Yuldashev, R. V. Nonlinear analysis of PLL by the harmonic balance method: limitations of the pull-in range estimation. IFAC-PapersOnLine, 2017.
4. Gardner, F.M. Phaselock Techniques. Wiley, 3rd edition, 2005.
5. Stensby, J.L. Phase-Locked Loops: Theory and Applications. Taylor & Francis, 1997.
6. Leonov, G. A., Kuznetsov, N. V., Yuldashev, M. V., Yuldashev, R. V. Hold-in, pull-in, and lock-in ranges of PLL circuits: rigorous mathematical definitions and limitations of classical theory. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015.
7. Leonov, G.A., Reitmann, V., Smirnova, V.B. Non-Local Methods for Pendulum-Like Feedback Systems. Stuttgart: Teubner, 1992.
8. Патент РФ № 2 565 526 C1; МПК H03L 7/00.
9. USA Patent No. 0,285,467, Int.C1. H03L7/103, H03L7/0991, H03L7/087.
10. Патент РФ № 2 449 463 C1; МПК H03D 13/00.
11. Патент РФ № 2 625 557 C1; МПК H03D 13/00, G06F 1/12 (прототип).

Используемые термины

Перемножитель двух сигналов: электронное устройство с двумя входами и одним выходом, генерирующий на выходе сигнал (напряжение) равный произведению сигналов (напряжений), поступающих на два входа.

Фазовый детектор (ФД): в электронике, устройство, сравнивающее фазы двух входных сигналов. Обычно, один из них генерируется генератором сигнала, управляемым напряжением, а второй берется из внешнего источника. ФД обычно имеет один выходной сигнал, управляющий стоящей за ним схемой фазовой автоподстройки (задача схемы фазовой автоподстройки сделать фазы входных сигналов одинаковыми), другими словами фазовым детектором называют устройство, предназначенное для создания сигнала, пропорционального разности фаз между генерируемым сигналом и эталонным сигналом. (Существуют различные электронные реализации ФД: например, перемножитель двух сигналов, XOR и др.)

Передаточная функция: один из способов математического описания динамической системы. Используется в основном в теории управления, связи и цифровой обработке сигналов. Представляет собой

дифференциальный оператор, выражающий связь между входом и выходом линейной стационарной системы. Зная входной сигнал системы и передаточную функцию, можно восстановить выходной сигнал.

Фильтр нижних частот: электронный или любой другой фильтр, эффективно пропускающий частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза) и уменьшающий (подавляющий) частоты сигнала выше этой частоты. Степень подавления каждой частоты зависит от вида фильтра.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для определения границ рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки, выполненное в корпусе и содержащее эталонный генератор высокостабильного по частоте колебания, выход которого подключен к первому входу фазового детектора, который выполнен в виде перемножителя двух сигналов, выход фазового детектора подключен к первому входу фильтра нижних частот второго порядка, передаточная функция которого задана соотношением:

$$H(s) = \frac{bcs+c}{s(s+a)} + c,$$

где $H(s)$ - передаточная функция фильтра нижних частот,

s - комплексная переменная,

$a>0$, $b>0$ и $c>0$ - первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот, удовлетворяющие соотношениям:

$$a(a+b)>1, ab \neq 1,$$

выход фильтра нижних частот подключен к первому входу усилителя постоянного тока, выход усилителя постоянного тока подключен к управляющему входу подстраиваемого генератора высокостабильного по частоте колебания, выход подстраиваемого генератора подключен ко второму входу фазового детектора, блок определения границ рабочего диапазона, выполненного в виде арифметического контроллера с обеспечением точности вычислений не менее четырех знаков после запятой, определяющего допустимое отклонение частоты ω_1 сигнала подстраиваемого генератора от частоты сигнала эталонного генератора по формуле:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{Kc}{a}},$$

где K - коэффициент усиления усилителя постоянного тока, выход блока определения границ рабочего диапазона подключен к регистратору, который фиксирует границы рабочего диапазона системы фазовой автоподстройки частоты, блок задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока, первый выход которого подключен ко второму входу усилителя постоянного тока, второй выход блока задания коэффициента усиления усилителя постоянного тока подключен к первому входу блока определения границ рабочего диапазона, отличающееся тем, что устройство дополнительно содержит блок задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен ко второму входу фильтра нижних частот, а второй выход блока задания первого коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен ко второму входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен к третьему входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания второго коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к третьему входу блока определения границ рабочего диапазона, блок задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот, первый выход которого подключен к четвертому входу фильтра нижних частот, второй выход блока задания третьего коэффициента передаточной функции фильтра нижних частот подключен к четвертому входу блока определения границ рабочего диапазона.

2. Способ для определения границ рабочего диапазона систем фазовой автоподстройки по п.1, заключающийся в том, что задают два высокостабильных по частоте колебания сигнала, один из которых выбирают эталонным, а второй выбирают подстраиваемым, причем диапазон их частот выбирают от 20 кГц до 20 ГГц, после чего по соотношению этих двух сигналов задают дополнительный сигнал, который с помощью фильтра нижних частот подвергают фильтрации, и дополнительный сигнал используют в качестве управляющего сигнала, отличающийся тем, что формы эталонного и подстраиваемого сигналов выбирают синусоидальной и косинусоидальной соответственно, в качестве фильтра нижних частот выбирают фильтр нижних частот второго порядка с передаточной функцией вида:

$$H(s) = \frac{bcs+c}{s(s+a)} + c,$$

где $H(s)$ - передаточная функция фильтра нижних частот,

s - комплексная переменная,

$a>0$, $b>0$ и $c>0$ - первый, второй и третий коэффициенты передаточной функции фильтра нижних частот, удовлетворяющие соотношениям:

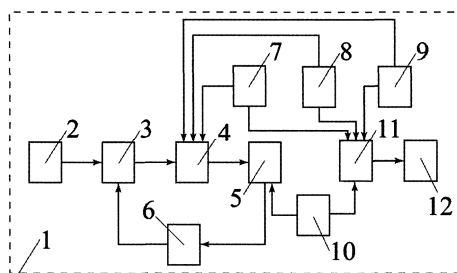
$$a(a+b)>1, ab \neq 1,$$

а частоту подстраиваемого сигнала выбирают таким образом, чтобы абсолютное значение разности частоты эталонного и подстраиваемого сигналов было меньше, либо равно допустимого отклонения час-

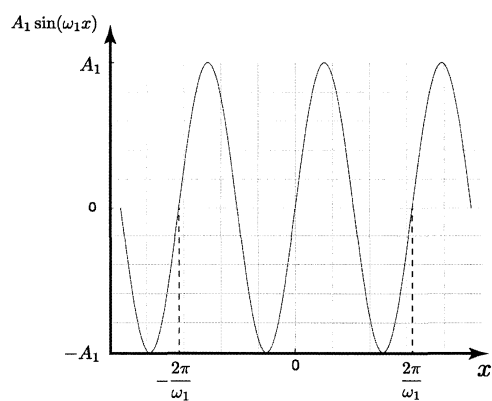
тоты ω_1 , причем допустимое отклонение частоты ω_1 задается по соотношению:

$$\omega_l = \sqrt{\frac{Kc}{a}},$$

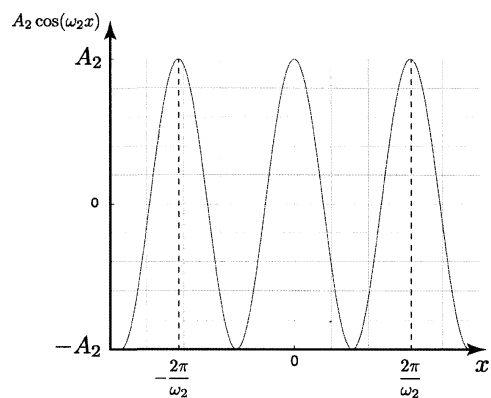
где K - коэффициент усиления усилителя постоянного тока.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3