



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **103493** (13) **U**
(51) МПК (2015.01)
H03L 9/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

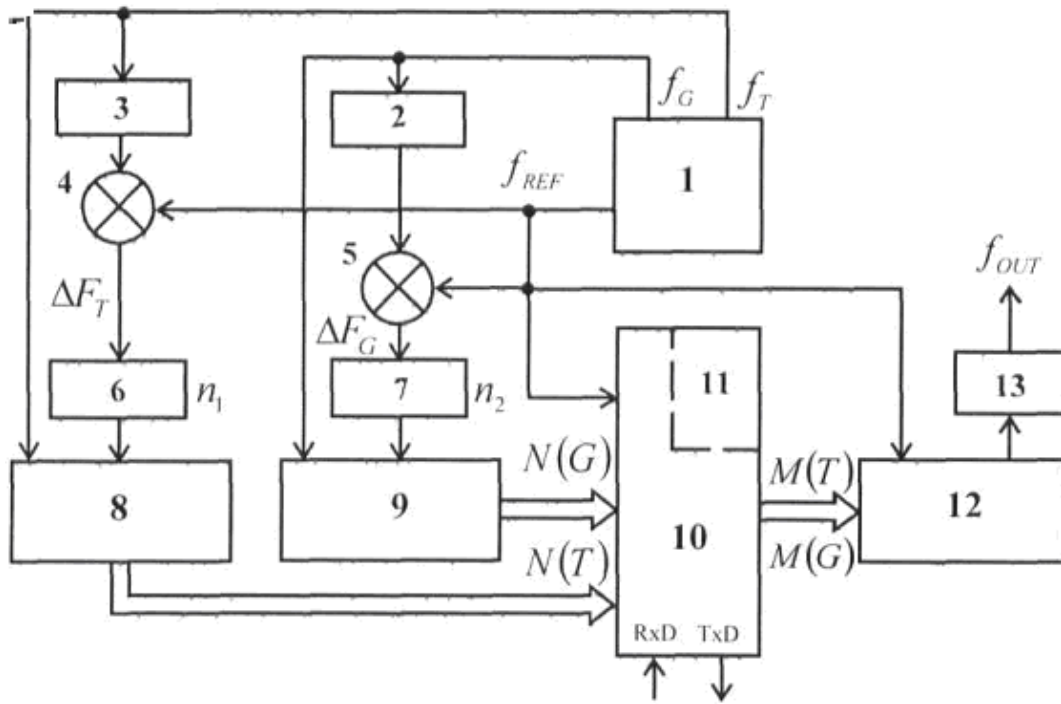
(21) Номер заявки: u 2015 01536	(72) Винахідник(и): Підченко Сергій Константинович (UA), Таранчук Алла Анатоліївна (UA), Хоптинський Руслан Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 23.02.2015	(73) Власник(и): ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.12.2015	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.12.2015, Бюл.№ 24	

(54) СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТИ

(57) Реферат:

Синтезатор частоти, містить опорний двочастотний кварцовий генератор, що збуджується на двох частотах опорної f_{REF} та температурно-чутливої f_T мод коливань, дробово-раціональний перетворювач температурно-чутливої частоти f_T , змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти температурної компенсації ΔF_T , дільник різницевої частоти ΔF_T з коефіцієнтом n_1 , лічильник імпульсів для формування температурно-залежного цифрового коду $N(T)$, мікроконтролер для формування на основі коду $N(T)$ спеціального коду керування $M(T)$, причому вихід лічильника імпульсів підключений до цифрового входу мікроконтролера, та інтегральний цифровий синтезатор частоти прямого синтезу, програмною зміною частоти якого на основі коду керування $M(T)$ проводиться компенсація температурної нестабільності опорної частоти f_{REF} . В опорному двочастотному кварцовому генераторі додатково збуджується вібраційно-чутлива (третя) мода коливань з частотою f_G , введені дробово-раціональний перетворювач вібраційно-чутливої частоти f_G , змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти вібраційної компенсації ΔF_G , дільник різницевої частоти ΔF_G з коефіцієнтом n_2 , лічильник імпульсів для формування вібраційно-залежного цифрового коду $N(G)$, вихід якого підключений до цифрового входу мікроконтролера для формування на основі коду $N(G)$ спеціального коду керування $M(G)$ інтегральним цифровим синтезатором частоти прямого синтезу для компенсації його вібромеханічної нестабільності.

UA 103493 U



Корисна модель належить до пристроїв генерування та формування сигналів, зокрема до високостабільних джерел опорних коливань на основі цифрового синтезу частоти з колами термо- та віброкомпенсації, і може бути використана в області цифрового радіозв'язку, радіомовлення та телебачення, радіолокації, радіонавігації та вимірювальної техніки.

5 Відомі інтегральні цифрові синтезатори частоти прямого синтезу, наприклад [1, 2], які містять тактовий кварцовий генератор, суматор для накопичення цифрового коду фази сигналу, постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) з таблицею перекодування та цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), причому вихід суматора під'єднаний до адресних входів ПЗП, вихід ПЗП - до входу ЦАП, а вихід ЦАП є виходом синтезатора. Недоліком даних пристроїв є низька температурна та вібромеханічна стабільність вихідної частоти, пов'язана з низькою стабільністю типових (моночастотних) кварцових генераторів, які запропоновано використовувати як тактові. Використання високостабільних квантових стандартів частоти як тактових, в даному випадку, втрачає сенс із-за суттєвого погіршення масогабаритних та енергетичних характеристик інтегральних синтезаторів частоти.

15 Найбільш близьким до запропонованого пристрою аналогом (пристрій-прототип) є термокомпенсований синтезатор частоти [3], який містить опорний двочастотний кварцовий генератор, що збуджується на двох частотах опорної f_{REF} та температурно-чутливої f_T мод коливань, дробово-раціональний перетворювач температурно-чутливої частоти f_T , змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти температурної компенсації ΔF_T , дільник різницевої частоти ΔF_T з коефіцієнтом n_1 , лічильник імпульсів для формування температурно-залежного цифрового коду $N(T)$, мікроконтролер для формування на основі коду $N(T)$ спеціального коду керування $M(T)$ та інтегральний цифровий синтезатор частоти прямого синтезу, програмною зміною частоти якого на основі коду керування $M(T)$ проводиться компенсація температурної нестабільності опорної частоти f_{REF} .

25 Недоліком даного синтезатора є відсутність компенсації вібраційної нестабільності частоти, що знижує точнісні характеристики пристрою в умовах зовнішніх вібромеханічних навантажень.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення вібромеханічної стабільності частоти вихідного сигналу інтегрального цифрового синтезатора частоти прямого синтезу.

30 Для досягнення поставленої задачі пропонується цифровий синтезатор частоти (фіг. 1), який містить багаточастотний кварцовий генератор (БКГ) 1 для формування опорної f_{REF} та додаткових температурно- та віброчутливих f_T , f_G мод коливань, дробово-раціональні перетворювачі 2, 3 частот f_T і f_G , змішувачі сигналів 4 і 5 для виділення різницевих частот температурної ΔF_T та вібраційної ΔF_G компенсації, дільники різницевих частот 6 і 7 з коефіцієнтами ділення n_1 і n_2 , лічильники імпульсів 8 і 9 для формування температурно-залежного $N(T)$ та вібраційно-залежного $N(G)$ цифрових кодів, мікроконтролер 10 з постійним запам'ятовуючим пристроєм 11 для формування кодів керування цифровим синтезатором частоти $M(T)$ і $M(G)$, інтегральний цифровий синтезатор частоти прямого синтезу (DDS) 12, фільтр нижніх частот 13.

Синтезатор частоти працює наступним чином.

40 Багаточастотне збудження кварцового резонатора (КР) забезпечує суміщення його функцій зі стабілізації частоти та вимірювання (ідентифікації) факторів зовнішнього впливу (температури, вібрації) [4]. Залежності частот КР від температури T та вібраційного прискорення G представляються як:

$$f_{REF} = f_{REF}^0 + a_{1T}T + a_{1G}G, \quad (1)$$

45

$$f_T = f_T^0 + a_{2T}T + a_{2G}G, \quad (2)$$

$$f_G = f_G^0 + a_{3T}T + a_{3G}G, \quad (3)$$

де f_{REF}^0 , f_T^0 , f_G^0 - номінальні значення частот на входах змішувачів 4 і 5, які задовольняють співвідношенням $f_{REF}^0 \approx \frac{k_1}{k_2} f_T^0$, $f_{REF}^0 \approx \frac{k_3}{k_4} f_G^0$, $\frac{k_1}{k_2}$, $\frac{k_3}{k_4}$ - коефіцієнти

50 перетворення частоти дробово-раціональних перетворювачів 2, 3 частот f_T і f_G ; a_{1T} , a_{2T} , a_{3T} та a_{1G} , a_{2G} , a_{3G} - коефіцієнти термочутливості та коефіцієнти віброчутливості кварцового генератора 1.

На виході змішувачів 4 і 5 виділяються коливання різницевих частот:

$$F_T = f_T - f_{REF} = (f_T^0 - f_{REF}^0) + a_1^* T + a_2^* G = F_T^0 + \Delta F_T, \quad (4)$$

$$F_G = f_G - f_{REF} = (f_G^0 - f_{REF}^0) + a_3^* T + a_4^* G = F_G^0 + \Delta F_G, \quad (5)$$

де $a_1^* = (a_{2T} - a_{1T})$, $a_2^* = (a_{2G} - a_{1G})$, $a_3^* = (a_{3T} - a_{1T})$, $a_4^* = (a_{3G} - a_{1G})$ - різниці коефіцієнти.

Розв'язуючи сумісно (4) та (5), отримаємо можливість одночасної ідентифікації температури T та вібраційного прискорення G:

$$T = \frac{a_4^* \Delta F_T - a_2^* \Delta F_G}{a_1^* a_4^* - a_2^* a_3^*}; \quad G = \frac{a_1^* \Delta F_G - a_3^* \Delta F_T}{a_1^* a_4^* - a_2^* a_3^*}, \quad (6)$$

Для оцінки ефективності компенсації вібраційної нестабільності синтезатора частоти проаналізована вібраційна чутливість прецизійного АТ-резонатора для 3-тої ($f_{03}=3891703$ Гц та 5-тої $f_{05}=6467048$ Гц) механічних гармонік. Діапазон частот вібрацій f_G становив (15...30) Гц за прискорення $G = (15...20)g$.

Ступінь зв'язку у процесі статистичної обробки результатів експериментів оцінювалась коефіцієнтом Пірсона. При об'ємі вибірок $\Delta f_{k,i}$ $m \leq 50$ для визначення емпіричного коефіцієнта кореляції зсувів частот Δf_i і Δf_j використана формула [5]:

$$r_k = \frac{m \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} - \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \sum_{k=1}^M \Delta f_{jk}}{\left[\left(m \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik}^2 - \left(\sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \right)^2 \right) \left(m \sum_{k=1}^M \Delta f_{jk}^2 - \left(\sum_{k=1}^M \Delta f_{jk} \right)^2 \right) \right]^{1/2}}, \quad (7)$$

Так як r_k є випадковою величиною, то необхідно вирішити наступні завдання, припускаючи, що величини вимірюваних девіацій розподілені за нормальним законом:

1) оцінити значимість r_k , тобто істотність відмінності від нуля;

2) знайти довірчі границі, у яких перебуває значення істинного коефіцієнта кореляції;

3) оцінити суттєвість розходження між коефіцієнтами кореляції r_{ki} і $r_{k\hat{a}}$, отриманими при обробці перших нижньої і верхньої спектральних складових вихідного спектру БКГ. Це завдання є характерним для спектрального методу досліджень багаточастотних п'єзорезонансних коливальних систем із-за виникнення асиметрії спектру, що обумовлено виникненням паразитної амплітудної модуляції (модуляції динамічного опору R_{qj} , $j = \overline{1,3}$).

Для розв'язання даних завдань використаний метод Фішера, згідно з яким випадкова величина r_k , відмінна від нормальної, перетворюється у випадкову величину $\bar{z} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_k}{1-r_k}$, яка

підпорядковується нормальному закону із середнім квадратичним відхиленням $\sigma_z = 1/\sqrt{M-3}$.

Результати вимірювань приведені у табл. 1, а результати їх обробки у табл. 2. Вони свідчать про наявність сильного кореляційного зв'язку $r_k > 0,95$ між відхиленнями резонансних частот БПКС та незначний вплив паразитної амплітудної модуляції, що підтверджує високу ефективність використання багаточастотно-алгоритмічного методу компенсації вібраційних впливів на БКГ [4].

Лічильниками імпульсів 8 і 9 формуються цифрові коди (рис. 1), які відображають зміни частот різницевого коливальника (4), (5) під дією температурних та вібраційних впливів:

$$\Delta N(T) = f_T \frac{n_1}{\Delta F_T}, \quad \Delta N(G) = f_G \frac{n_2}{\Delta F_G}, \quad (8)$$

де n_1 , n_2 - коефіцієнти ділення дільників частоти 6 і 7.

5 На основі кодів (8) мікроконтролер 10 формує відповідно до (1)-(3), (6) коректуючі коди $\Delta M(T)$, $\Delta M(G)$ для компенсації нестабільності інтегрального синтезатора частоти 12 під дією температурних та вібраційних впливів. Коефіцієнти термочутливості a_{1T} , a_{2T} , a_{3T} та віброчутливості a_{1G} , a_{2G} , a_{3G} попередньо заносяться до ПЗП мікроконтролера для конкретного типу БКГ.

Таблиця 1

Результати вимірювань вібраційної чутливості КР

k	f_G , Гц	Δf_{i3} , Гц	Δf_{i5} , Гц	Δf_{a3} , Гц	Δf_{a5} , Гц
1	17	5,51	8,56	5,42	7,75
2	17	5,43	9,39	4,38	8,32
3	17	5,38	8,71	4,35	7,3
4	17	5,1	8,37	4,58	7,53
5	19	9,24	12,28	7,43	11,38
6	19	9,46	13,16	7,31	13,39
7	21	10,73	16,48	9,9	17,23
8	21	11,53	15,86	9,96	16,59
9	21	11,66	16,2	11,01	16,69
10	21	11,21	17,57	10,68	17,57
11	21	9,67	16,3	9,34	16,55
12	21	12,24	17,41	9,48	17,41
13	23	14,56	22,14	11,52	21
14	23	14,73	23,49	12,5	21,3
15	23	15,2	23,49	12,1	19,85
16	24	15,7	28,87	11,73	20,66
17	24	16,93	26,97	13,3	21,62
18	24	15,44	24,95	12,76	21,47
19	24	16,89	25	12,76	22,21
20	24	17,26	26,54	13,3	22,08
21	25	18,53	32,33	12,62	22,55
22	25	19,85	33,72	13,13	24,91
23	25	19,78	31,19	14,77	24,56
24	25	20,08	32,15	14,29	24,56
25	25	20,65	33,56	14,79	23,38
26	25	18,88	33,49	14,37	24,4
27	25	20,2	33,03	14,23	24,93
28	25	18,96	33,39	12,95	24,96
29	25	18,98	32,77	14,03	24,47
30	25,5	19,95	33,81	14,47	26,96
31	25,5	20,6	33,5	15,23	25,82
32	25,5	19,86	34,46	14,66	25,57
33	25,5	19,63	34,46	15,24	25,32
34	26	19,22	34,82	14,95	24,54
35	26	21,1	36,14	15,74	26,23
36	26	18,45	35,34	15,77	27,14
37	26	19,62	35,21	14,66	27,88
38	26	19,71	35,23	16	27,68
39	26	20,9	35,21	15,85	27,21
40	27,5	25,97	44,86	16	29,57
41	27,5	24,64	42,22	16,07	27,45
42	27,5	26,23	42,69	16,57	28,62
43	27,5	25,312	42,53	17,95	28,88
44	27,5	26,68	43,42	17,19	30,53
45	27,5	25,45	42,83	17,13	30,53

Результати обробки вимірювань вібраційної чутливості КР

r_k	r_{k1}	r_{k2}	\bar{z}/σ_z	d_z/σ_d
$r_{ki} = 0,9865$	0,9628	0,9951	16,17	0,715
$r_{k\hat{a}} = 0,9816$	0,9496	0,9934	15,16	

Фільтр нижніх частот 13 слугує для покращення спектрального складу вихідного сигналу цифрового синтезатора частоти (усунення сходинковості після цифро-аналогового перетворення).

Запропонований цифровий синтезатор частоти прямого синтезу забезпечує більш високу стабільність частоти вихідних коливань у порівнянні з аналогами (від п'яти до десяти разів, в залежності від типу кварцового резонатора) за рахунок компенсації вібродинамічної складової нестабільності опорного багаточастотного кварцового генератора з поточною ідентифікацією теплових та вібраційних дестабілізуючих впливів.

Джерела інформації:

1. Стариков О. Прямой цифровой синтез частоты и его применение // Инженерная практика. 2002. - № 3. - С. 56-64.

2. CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer AD9850. Data Sheet Analog Devices Inc. Norwood, MA. USA.

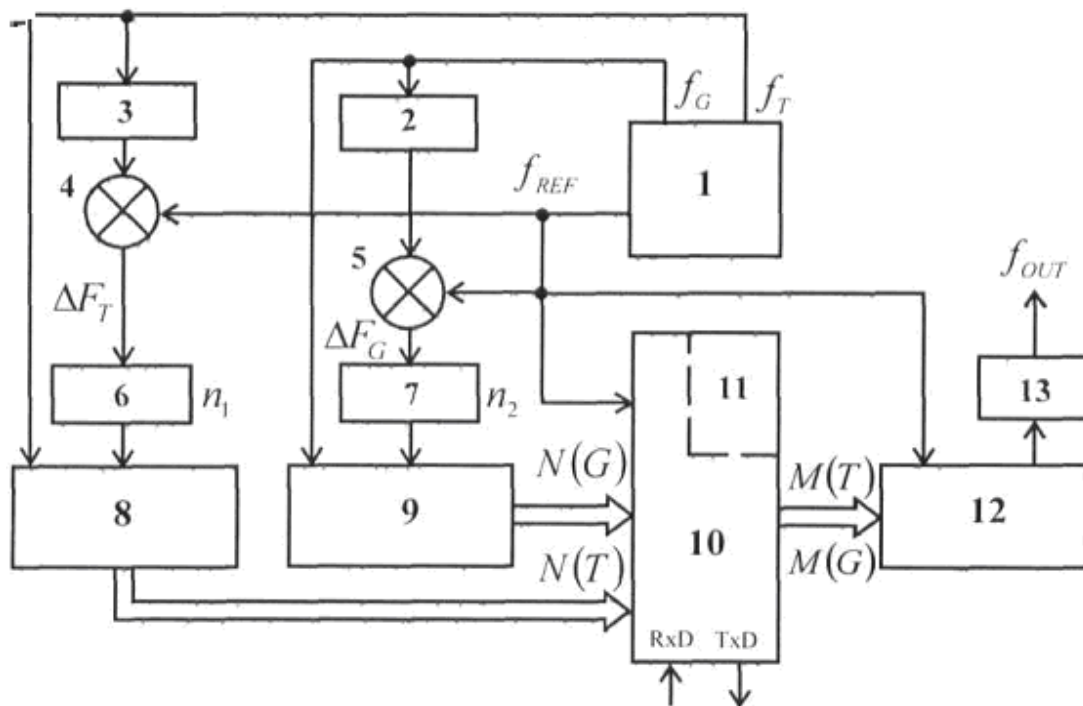
3. V. Stofanik. An improvement in the temperature-compensated DDS / V. Stofanik, I. Balaz, M. Minarik // Proc. of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium. - P. 662-664.

4. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзореzonансних коливальних систем / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. - Харків: Нац. аерокосм. ун-т "Харьк. авіац. ін-т", 2011. - 327 с.

5. Бурковская В.Л. Методика оценка корреляционной связи между двумя выборками, представляющими собой результаты измерения в одноименных и разноименных шкалах / В.Л. Бурковская, С.Г. Макарова, В.П. Осипов, Н.В. Осипов, Л.Г. Комарова. - Киев., 1984. - 16 с. - Деп. в УкрНИИТИ 2.03.1985, № 619Ук-85.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Синтезатор частоти, який містить опорний двочастотний кварцовий генератор, що збуджується на двох частотах опорної f_{REF} та температурно-чутливої f_T мод коливань, дробово-раціональний перетворювач температурно-чутливої частоти f_T , змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти температурної компенсації ΔF_T , дільник різницевої частоти ΔF_T з коефіцієнтом n_1 , лічильник імпульсів для формування температурно-залежного цифрового коду $N(T)$, мікроконтролер для формування на основі коду $N(T)$ спеціального коду керування $M(T)$, причому вихід лічильника імпульсів підключений до цифрового входу мікроконтролера, та інтегральний цифровий синтезатор частоти прямого синтезу, програмною зміною частоти якого на основі коду керування $M(T)$ проводиться компенсація температурної нестабільності опорної частоти f_{REF} , який **відрізняється** тим, що в опорному двочастотному кварцовому генераторі додатково збуджується вібраційно-чутлива (третя) мода коливань з частотою f_G , введені дробово-раціональний перетворювач вібраційно-чутливої частоти f_G , змішувач, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти вібраційної компенсації ΔF_G , дільник різницевої частоти ΔF_G з коефіцієнтом n_2 , лічильник імпульсів для формування вібраційно-залежного цифрового коду $N(G)$, вихід якого підключений до цифрового входу мікроконтролера для формування на основі коду $N(G)$ спеціального коду керування $M(G)$ інтегральним цифровим синтезатором частоти прямого синтезу для компенсації його вібромеханічної нестабільності.



Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601