

БІЛИК О. Б.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8169-8679>e-mail: [vdvsasha2@gmail.com](mailto:vdvsasha2@gmail.com)

КОНОНОВ С. П.

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [knnvknnv@ukr.net](mailto:knnvknnv@ukr.net)

## НОВИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ВИСОКОСТАБІЛЬНОГО ДІАПАЗОННОГО НВЧ-ГЕНЕРАТОРА

*Розглядається діапазонний НВЧ генератор. В петлі ФАПЧ генератора встановлений помножувач частоти. У генераторі відсутній дільник частоти, тому він має підвищену стабільність через низький вихідний рівень фазового шуму. Запропонований пристрій може використовуватися в телекомунікаційному і радіотехнічному обладнанні.*

*Ключові слова: діапазонний генератор, НВЧ генератор, частотна нестабільність, фазовий шум, генератор гармонік, помножувач частоти, перемножувач, фільтр, ФАПЧ, опорна частота.*

Oleksandr BILYK

Vinnytsia National Technical University

Serhii KONONOV

Vinnytsia National Technical University

### A NEW APPROACH TO CREATING A HIGHLY STABLE RANGE MICROWAVE GENERATOR

*A range microwave generator is considered. A frequency multiplier is installed in the PLL loop of the generator. There is no frequency divider in the generator. It has increased stability due to low output phase noise. The proposed device can be used in telecommunications and radio equipment. The microwave generator consists of an autogenerator, three multipliers, a bandpass filter, two low-pass filters, a reference frequency unit, a harmonic generator, and a control unit. Auxiliary units of the generator are two adders, a key and two controllers. The first multiplier together with the bandpass filter works as a stroboscopic transducer, the second - as a quadrator, the third with a low-pass filter - as a phase detector. The inputs of the stroboscopic converter receive two voltages from the harmonic generator. The frequencies of the first voltage harmonics are close. Voltages have the form of short pulses and are enriched with harmonics. After the signal at the output of the first low-pass filter, the first controller opens the key, switches the reference frequency node and through the second controller closes the PLL loop. The control unit sets the reference frequencies and changes the frequency of the autogenerator. The main nodes of the PLL loop are the third multiplier with the second low-pass filter. Auto-tuning of the generator begins with the appearance of the control signal from the quadrator. The signal appears after the strobe conversion frequency at the output of the bandpass filter coincides with the center frequency. The frequency instability of the range generator decreases. It is approaching the instability of the reference frequency. The stability of the reference frequencies determines the relative frequency error of the range of the microwave generator. The maximum frequency depends on the parameters and dynamic properties of the autogenerator, stroboscopic transducer and harmonic generator. A high-quality harmonic generator will provide a low level of phase noise. The structural scheme of the microwave generator is offered and its work is explained. The analysis of the mathematical model of the microwave generator is performed. The formulas of interrelation of voltages of knots with initial oscillation of the generator are received. Computer simulations have confirmed that the output frequency can be stabilized in the generator.*

*Keywords: band generator, microwave generator, frequency instability, phase noise, harmonic generator, frequency multiplier, multiplier, filter, PLL, reference frequency.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В електронних системах широко застосовується НВЧ генераторне обладнання. Основними показниками якості такого обладнання є висока частотна стабільність і чистота спектру, яка визначається, в першу чергу, рівнем фазового шуму. Поширеним способом реалізації таких параметрів є використання частотного синтезу непрямої дії на основі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) у комбінації з генерацією НВЧ коливання за допомогою ЗІГ-резонатора, LC-структури або інших резонаторів, таких як смуговий, об'ємний, діелектричний та інші.

В класичному варіанті в петлі ФАПЧ відбувається ділення частоти з великим коефіцієнтом, що призводить до значного збільшення рівня фазового шуму, а відповідно, до погіршення частотної стабільності генератора [1,2]. Як вихід із ситуації замість ділення використовують операцію перенесення на низьку частоту порівняння в петлі ФАПЧ. Для цього в генераторі встановлюють один або більше перетворювачів частоти. Чим вище частота генерації, тим складніше формувати опорні коливання для таких перетворювачів. Розробники шукають інші шляхи створення якісних НВЧ генераторів. Один з них ґрунтується на застосуванні у частотному синтезі непрямої дії з ФАПЧ в оптимальній комбінації разом із перетворенням частоти операції множення частоти.

### Аналіз досліджень та публікацій

Серед відомих генераторів, у петлі ФАПЧ яких відсутній дільник частоти, виділимо два.

Перший запропоновано фірмою Analog Devices (рис. 1) [1]. Автогенератор (АГ) керується через фільтр нижніх частот (ФНЧ) напругою з виходу фазо-частотного детектора (ФЧД), в якому порівнюються з

точністю до фази частота від вузла опорної частоти (ОЧ) і проміжна частота з виходу перетворювача на перемножувачі сигналів (ПС) і смуговому фільтрі (СФ).

На опорний вхід перемножувача (ПС) подається сигнал від вузла прямого цифрового синтезу (DDS), роботу якого задає вузол тактової частоти (ТЧ). Генератор має високу частотну стабільність з низьким рівнем фазового шуму, але обмежений зверху потенційними можливостями вузла DDS частотний діапазон (до 4 ГГц).

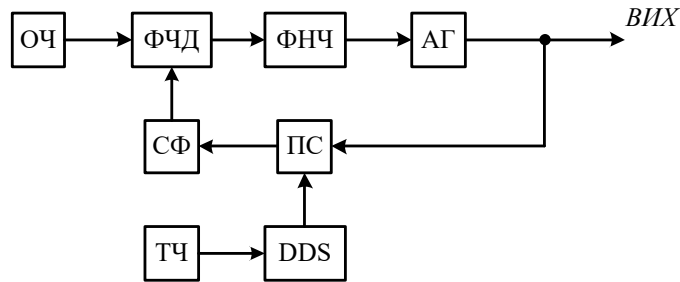


Рис. 1. Генератор фірми Analog Devices

Максимальна частота НВЧ генератора, який входить до складу аналізатора спектру СК4 – БЕЛАН набагато вища (рис. 2) [2]. Це досягнуто завдяки використанню генератора гармонік (ГГ) як джерела одного з вхідних сигналів перетворювача на перемножувачі ПС та фільтрі СФ. Генератор ГГ на діодах з накопиченням заряду управляється спеціальним синтезатором частоти (СЧ).

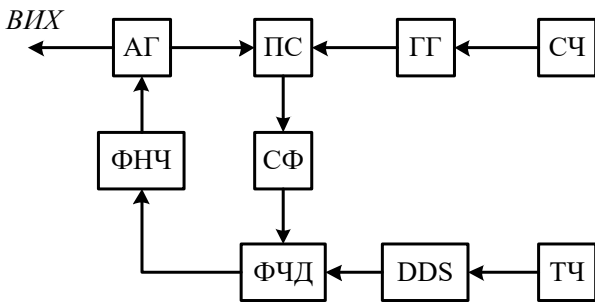


Рис. 2. НВЧ генератор аналізатора спектру

На відміну від генератора (рис. 1) частота порівняння петлі ФАПЧ змінна, а в схемі присутні два джерела фазового шуму – вузли СЧ і DDS. В результаті, частотна стабільність НВЧ генератора погіршується.

**Виклад основного матеріалу**

Структурна схема та пояснення роботи.

Запропонований діапазонний НВЧ генератор (рис. 3) є модифікацією [3] і працює наступним чином.

На вхід блоку управління (БУ) надходить цифровий код про частоту  $f$ , яку необхідно встановити на виході генератора. По першому виходу блоку БУ запускається другий керувач (К2). Він починає лінійно в часі змінювати частоту автогенератора (АГ). По другому виходу блоку БУ встановлюються на виході вузла опорних частот (ОЧ) два стабільних коливання із близькими частотами  $f_1$  і  $f_2$ , причому  $f_2 > f_1$ . Частоти знаходяться з системи рівнянь

$$\begin{cases} f = N(f_1 + f_2) / 2, \\ f_0 = N(f_2 - f_1) / 2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $N$  – постійний коефіцієнт множення частоти (ціле число в межах 4, ..., 25 або більше),  $f_0$  – постійна центральна частота регулювання в петлі ФАПЧ, причому  $f_0 \ll f$ .

Розв’язок системи рівнянь дає наступне:

$$f_1 = (f - f_0) / N, f_2 = (f + f_0) / N. \quad (2)$$

Генератор гармонік (ГГ) формує на виходах короткі імпульси з частотами повторення  $f_1$  і  $f_2$ , відповідно. Амплітудний спектр цих імпульсних послідовностей з максимальним номером гармоніки  $N$  рівномірний у всьому діапазоні частот генератора. На виході першого суматора (С1) утворюється об’єднана імпульсна послідовність.

Перший аналоговий перемножувач (АП1) працює в режимі стробоскопічного змішувача, другий АП2 – в режимі квадратора, а третій АП3 – як фазовий детектор.

На діаграмі (рис. 4) показано, чому дорівнює частота (в межах від 0 до  $2f_0$ ) продуктів перетворення на виході перемножувача АП1, якщо частота діапазонного НВЧ генератора змінюється на  $\pm 3f_0$  відносно частоти  $f$ . Перебудова генератора АГ закінчується в момент, коли з виходу смугового фільтра (СФ) зі смугою пропускання  $f_0 / N$  на замкнуті входи перемножувача АП2 надходить сума двох коливань з частотою  $f_0$  (рис. 4, точка А).

Після появи низькочастотної напруги з постійною складовою на виході першого фільтра нижніх частот (Ф1) зі смугою пропускання  $f_0 / 2N$  керувач К1 знімає з виходу вузла ОЧ коливання з частотою  $f_2$  і відкриває ключ (КЛ). Крім того, керувач К2 зупиняє перебудову генератора АГ.

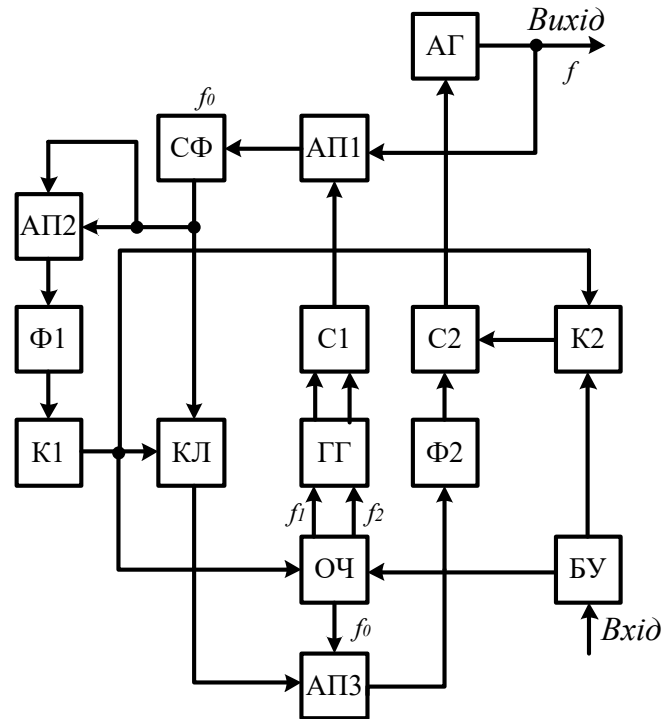


Рис. 3. Структурна схема діапазонного НВЧ генератора

Замикається петля ФАПЧ, яка утворена перемножувачем АП1, фільтром СФ, перемножувачем АП3 та другим фільтром нижніх частот (Ф2) зі смугою пропускання на порядок меншою  $f_0 / 2N$ . На виході другого суматора (С2) до постійної напруги управління від керувача К2 додається напруга помилки фазового регулювання частоти від фільтра Ф2. В результаті, на виході НВЧ генератора формується коливання з частотою  $f$ . Його стабільність визначається частотною стабільністю коливання  $f_1$  від вузла ОЧ.

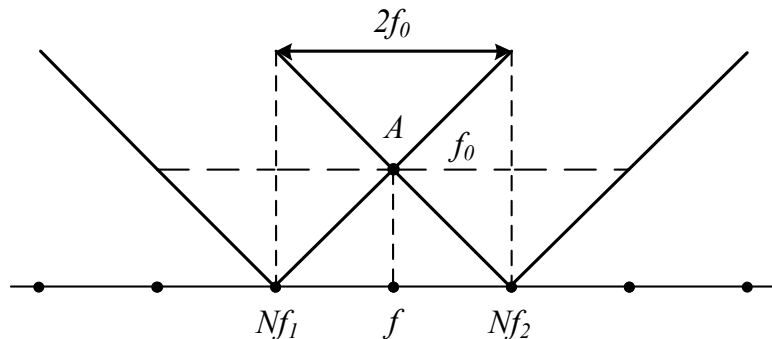


Рис. 4. Зміна частоти

Завдяки введенню у [3] нових елементів і зв'язків діапазонний НВЧ генератор без дільника частоти має низький рівень фазового шуму. Це робить функціонування пристрою у складі телекомунікаційного та радіотехнічного обладнання ефективнішим.

На відміну від генератора (рис. 2) в запропонованому пристрої частота порівняння петлі ФАПЧ постійна, а з двох згаданих відчутних джерел фазового шуму залишається одне – генератор гармонік.

**Математична модель.** Модель (рис. 5) складається з трьох перемножувачів (М1-М3) з коефіцієнтами перетворення  $m_1, m_2, m_3$ , відповідно, та трьох фільтрів з ідеалізованими прямокутними амплітудно-частотними характеристиками: смугового F1 з коефіцієнтом передачі  $k_{f1}$ , центральною частотою  $f_0$  та смугою пропускання  $f_0 / N$ ; нижніх частот F2 з коефіцієнтом передачі  $k_{f2}$  та смугою пропускання  $f_0 / 2N$ ; нижніх частот F3 з коефіцієнтом передачі  $k_{f3}$  та смугою пропускання  $\Delta f_{PLL}$ . Крім того, до моделі входить суматор  $\Sigma$  з одиничними коефіцієнтами передачі, який поєднує дві вхідних напруги  $u_1, u_2$  з близькими опорними частотами  $Nf_1, Nf_2$ , де  $N$  – номер гармоніки. На вхід ВХ надходить нестабільне НВЧ коливання частотою  $f$ , а на вхід ВХ.0 – опорне коливання петлі ФАПЧ частотою  $f_0$ . Напруга  $u_{f2}$  з виходу ВІХ використовується для включення ФАПЧ.

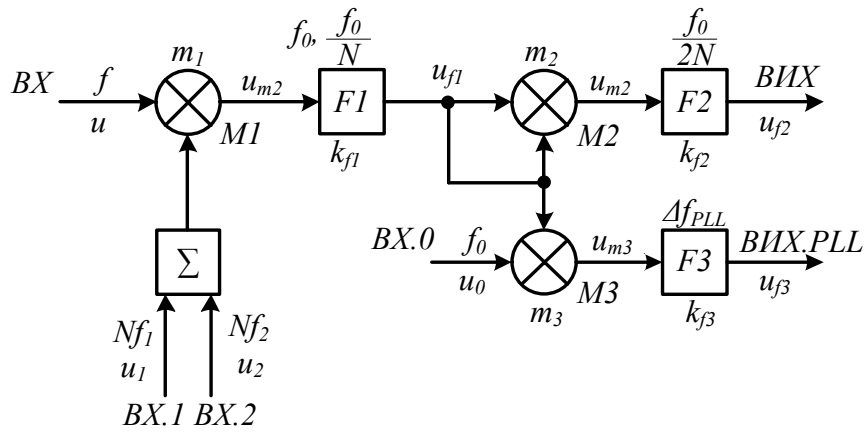


Рис. 5. Математична модель

Вхідне НВЧ коливання описується виразом

$$u = U \cos \psi(t), \tag{3}$$

де  $\psi(t)$  – повна фаза,  $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi(t)}{dt}$  – миттєва частота.

У випадку генерації коливання фіксовані частоти

$$u = U \cos 2\pi ft. \tag{4}$$

Якщо генератор змінює частоту лінійно в часі

$$u = U \cos[2\pi ft + \pi\gamma(t - t_0)^2], \tag{5}$$

де  $f(t) = f + \gamma(t - t_0)$  – миттєва частота,  $\gamma$  – швидкість зміни частоти. Моделювання буде проведено для НВЧ коливання, процес зміни частоти якого зупиняється при  $t = t_0$ .

Спочатку розглянемо випадок, коли при зупинці частота НВЧ коливання має нульове відхилення  $\Delta f = 0$ . Для спрощення будемо вважати, що вхідні напруги мають одиничну амплітуду.

На опорний вхід перемножувача M1 надходить сума двох напруг

$$u_1 + u_2 = \cos(2\pi Nf_1 t) + \cos(2\pi Nf_2 t). \tag{6}$$

На його виході формується коливання

$$u_{m1} = m_1 u (u_1 + u_2) = m_1 \cos(2\pi ft) [\cos(2\pi Nf_1 t) + \cos(2\pi Nf_2 t)], \tag{7}$$

де  $f_1 = \frac{1}{N}(f - f_0)$ ,  $f_2 = \frac{1}{N}(f + f_0)$ .

В результаті, отримуємо

$$u_{m1} = \frac{1}{2} m_1 \cos(2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} m_1 \cos(4\pi ft - 2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} m_1 \cos(-2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} m_1 \cos(4\pi ft + 2\pi f_0 t). \tag{8}$$

Смуговий фільтр F1 виділяє

$$u_{f1} = m_1 k_{f1} \cos(2\pi f_0 t). \tag{9}$$

На виході перемножувача M2 в режимі квадратора з'являється напруга

$$u_{m2} = m_2 u_{f1}^2 = m_2 m_1^2 k_{f1}^2 [\cos(2\pi f_0 t)]^2 = 0.5 m_2 m_1^2 k_{f1}^2 [1 + \cos(4\pi f_0 t)]. \tag{10}$$

З появою низькочастотної складової на виході фільтра F2  $u_{f2} = 0.5 m_2 k_{f2} m_1^2 k_{f1}^2$  вимикається опорне коливання з частотою  $Nf_2$ , тобто  $u_2 = 0$ .

Напруга на виході перемножувача M1 з цього моменту буде визначатися як

$$u_{m1} = m_1 u_1 u = m_1 \cos[2\pi(f - f_0)t] \cos(2\pi ft) = 0.5 m_1 [\cos(2\pi f_0 t) + \cos(4\pi ft - 2\pi f_0 t)]. \tag{11}$$

Фільтр F1 виділяє напругу:

$$u_{f1} = 0.5m_1k_{f1} \cos(2\pi f_0 t). \quad (12)$$

На виході перемножувача МЗ з'являється напруга:

$$u_{m3} = m_3 u_{f1} u_0 = 0.5m_3 m_1 k_{f1} \cos(2\pi f_0 t) \cos(2\pi f_0 t) = 0.25m_3 m_1 k_{f1} [1 + \cos(4\pi f_0 t)]. \quad (13)$$

З появою на виході ВИХ.PLL напруги  $u_{f3} = 0.25m_3 m_1 k_{f1}$  починає працювати ФАПЧ і стабілізується частота  $f$  генератора НВЧ діапазону.

Коли при  $t = t_0$  частота НВЧ коливання має ненульове, але маленьке відхилення, тобто дорівнює  $f + \Delta f$ , напруги в характерних точках моделі (рис. 5) такі:

$$u_{m1} = m_1 \{ \cos[2\pi(f - f_0)t] + \cos[2\pi(f + f_0)t] \} \cos[2\pi(f + \Delta f)t] = 0.5m_1 [ \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) + \cos(4\pi f t + 2\pi\Delta f t - 2\pi f_0 t) + \cos(-2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) + \cos(4\pi f t + 2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) ]; \quad (14)$$

$$u_{f1} = \frac{1}{2} m_1 k_{f1} [ \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) + \cos(-2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) ]; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_{m2} &= m_2 u_{f1}^2 = 0.25m_2 m_1^2 k_{f1}^2 [ \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) + \cos(-2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) ]^2 = \\ &= 0.25m_2 m_1^2 k_{f1}^2 [ 0.5 \cos(4\pi\Delta f t + 4\pi f_0 t) + 1 + \cos(4\pi\Delta f t) + \cos(4\pi f_0 t) + \\ &+ 0.5 \cos(-4\pi\Delta f t + 4\pi f_0 t) ]; \end{aligned} \quad (16)$$

$$u_{f2} = 0.25m_2 m_1^2 k_{f1}^2 k_{f2} [ 1 + \cos(4\pi\Delta f t) ]. \quad (17)$$

Після того, як відключається  $u_2$ :

$$u_{m1} = m_1 u_1 u = m_1 \cos[2\pi(f - f_0)t] \cos[2\pi(f + \Delta f)t] = 0.5m_1 [ \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) + \cos(4\pi f t + 2\pi\Delta f t - 2\pi f_0 t) ]; \quad (18)$$

$$u_{f1} = 0.5m_1 k_{f1} \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} u_{m3} &= m_3 u_{f1} u_0 = 0.5m_3 m_1 k_{f1} [ \cos(2\pi f_0 t) \cos(2\pi\Delta f t + 2\pi f_0 t) ] = 0.25m_3 m_1 k_{f1} \times \\ &\times [ \cos(2\pi\Delta f t) + \cos(4\pi f_0 t + 2\pi\Delta f t) ]; \end{aligned} \quad (20)$$

$$u_{f3} = 0.25m_3 m_1 k_{f1} k_{f3} \cos(2\pi\Delta f t). \quad (21)$$

В результаті проведеного аналізу математичної моделі отримані основні формули, які зв'язують вихідні напруги фільтра ФАПЧ і фільтра після квадратора з вхідними опорними напругами і з коливанням НВЧ генератора, частота якого стабілізується.

Комп'ютерне моделювання. Структура комп'ютерної моделі наведена на рис. 6. Мета дослідження – отримання часових залежностей напруги  $u_{ВИХ}$  смугового фільтра СФ2 після квадратора ХЗ на перемножувачі АП2 при різних співвідношеннях опорних частот  $Nf_1, Nf_2$  для випадку, коли НВЧ генератор Е1 змінює лінійно в часі частоту  $f$ . Коливання від генераторів V1, V2 з частотами  $Nf_1, Nf_2$  об'єднуються суматором С з коефіцієнтом передачі одиниця і подаються на опорний вхід змішувача Х1 на перемножувачі АП1.

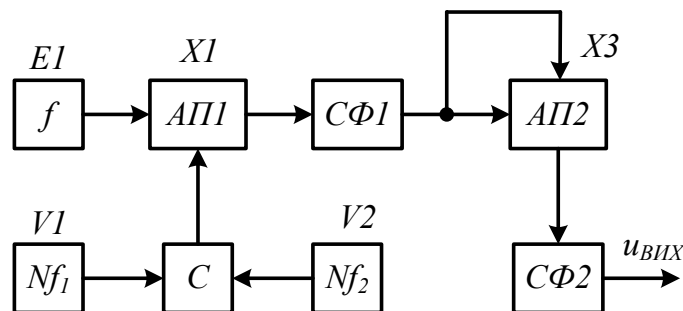


Рис. 6. Комп'ютерна модель

Схема (рис. 7), яка досліджувалася, відповідає комп'ютерній моделі (рис. 6). З метою зменшити похибку обчислень всі частоти генераторів і характерні частоти фільтрів зменшені в мільйон разів, а час дослідження збільшено в мільйон разів. Генератор E1 за 10 с змінює частоту від 48.75 кГц до 51.25 кГц зі швидкістю 0.25 кГц/с. Опорна частота  $Nf_1$  генератора V1 дорівнює 49.5 кГц, а частота  $Nf_2$  генератора V2 – 50.5 кГц. Тобто стабілізується частота генератора E1 50 кГц. Фільтр СФ1 L1, L2, C1 - C3 має центральну частоту  $f_0 = 500$  Гц і смугу пропускання 100 Гц. Смуга пропускання фільтра СФ2 на елементах R3, C4, R6, C5 – (5...50) Гц. Узгоджуючі підсилювачі X2, X4 мають одиничний коефіцієнт передачі. Коефіцієнт множення

$$N = 2f_0 / (f_2 - f_1) = 2f / (f_1 + f_2) = 5, \tag{22}$$

тобто  $f_1 = 9.9$  кГц;  $f_2 = 10.1$  кГц.

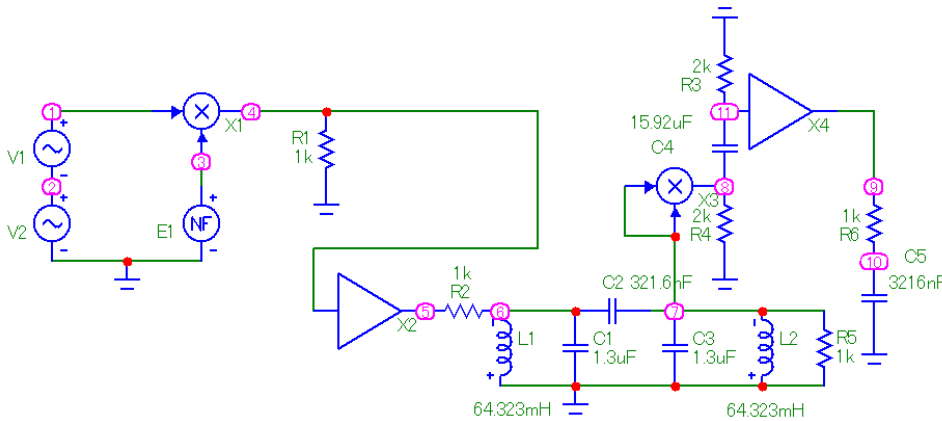


Рис. 7. Схема, яка досліджується

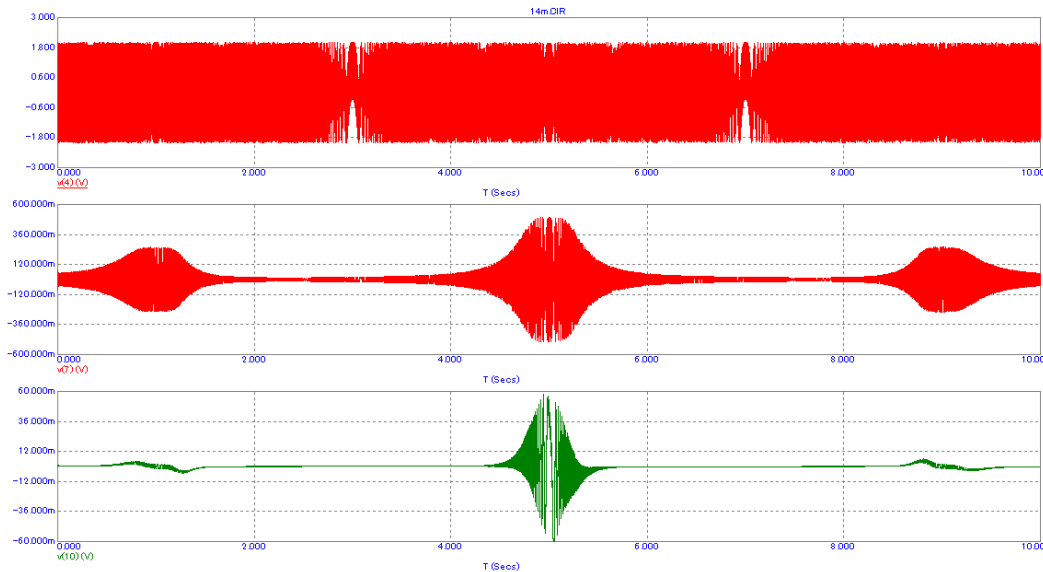


Рис. 8. Перехідні процеси при стабілізації частоти

Перехідні процеси у схемі (рис. 7) складаються з напруги у вузлі 4 на виході перемножувача X1, з вузлової напруги 7 на виході смугового фільтра і вихідної напруги у вузлі 10 (рис. 8). Наявність чіткого радіоімпульсу вихідної напруги при переході частоти  $f$  генератора E1 через 50 кГц свідчить про те, що саме ця частота стабілізуватиметься петлею ФАПЧ.

Якісно такі ж часові залежності отримаємо для випадку, коли генератор E1 за 10 мкс змінює частоту від 48.75 ГГц до 51.25 ГГц зі швидкістю 0.25 ГГц/мкс. Опорні частоти  $f_1, f_2$  дорівнюють 9.9 ГГц і 10.1 ГГц, відповідно. Стабілізується частота генератора E1 50 ГГц. Фільтр СФ1 (рис. 6) матиме центральну частоту 500 МГц зі смугою пропускання 100 МГц, а смуга пропускання фільтра СФ2 збільшиться до (5...50) МГц.

Розраховані перехідні процеси для стабілізації частоти 41.7 кГц або в перерахунку 41.7 ГГц (рис. 9). Можна зробити висновок, що вихідний радіоімпульс відсутній тобто ФАПЧ не спрацьовує і режим стабілізації частоти відсутній.

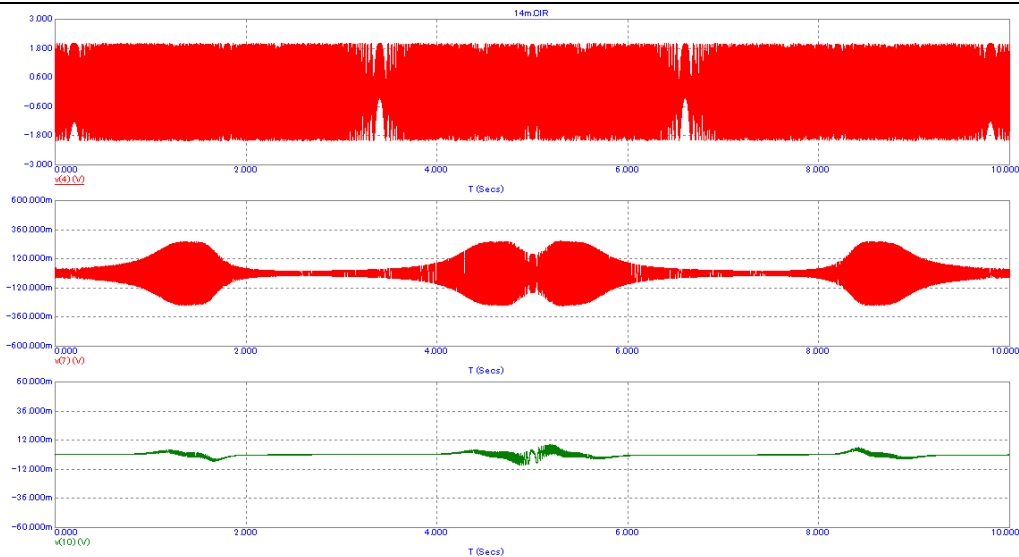


Рис. 9. Перехідні процеси за відсутності стабілізації частоти

Можна отримати подібні рис. 9 залежності для частоти стабілізації, яка виходить у той чи інший бік за межі зміни частоти генератора Е1. Ці залежності не будуть містити радіоімпульс, а це означає, що режим стабілізації відсутній.

Комп'ютерне моделювання підтвердило, що будь-якій частоті  $f$  НВЧ генератора відповідають такі дві близьких опорних частоти  $f_1, f_2$ , які для заданого коефіцієнта множення  $N$  дадуть на виході перетворювача суму двох коливань частотою  $f_0 = 0.5N(f_2 - f_1)$ , причому  $f_0 < 0.25f_1$  або  $f_2 - f_1 < f_1 / 2N$ .

У запропонованому генераторі шляхом правильного формування опорних частот можна стабілізувати за допомогою ФАПЧ вихідну частоту.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновано структурну схему високостабільного діапазонного НВЧ генератора та пояснено його роботу. Виконано аналіз математичної моделі НВЧ генератора. Отримані формули взаємозв'язку напруг окремих вузлів з вихідним коливанням генератора. Комп'ютерне моделювання підтвердило працездатність пристрою – в НВЧ генераторі можна стабілізувати вихідну частоту.

Стабільність вузла опорних частот визначає відносну похибку встановлення частоти НВЧ генератора –  $10^{-6}$  і краще. Його максимальна частота – 100 ГГц і більше, визначається параметрами і динамічними властивостями автогенератора, стробоскопічного змішувача та генератора гармонік. Якісний генератор гармонік забезпечить низький рівень фазового шуму вихідного коливання.

#### Література

1. Акар Э. Почему интегрированный синтезатор с переносом частоты в петле обратной связи обеспечивает наименьший уровень фазового шума / Э Акар // Электроника НТБ. – 2021. – № 10. – С. 94–99. – DOI: 10.22184/1992-4178.2021.211.10.94.99.
2. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц или борьба за децибелы / С. Бельчиков // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 139–146.
3. Білик О. Б. Високостабільний мікрохвильовий генератор з помножувачем частоти в петлі ФАПЧ / О.Б. Білик, С. П. Кононов // Міжнародна науково-технічна конференція " Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2021) ", Вінниця, 03-05 листопада, 2021 р. – 2021.

#### References

1. Akar E. Pochemu integrirovannyj sintezator s perenosom chastoty v petle obratnoj svyazi obespechivaet naimenshij uroven fazovogo shuma / E Akar // Elektronika NTB. – 2021. – № 10. – С. 94–99. – DOI: 10.22184/1992-4178.2021.211.10.94.99.
2. Belchikov S. Fazovyy shum: kak spustitsya nizhe –120 dBn/Gc na otstrojke 10 kGc v diapazone chastot do 14 GGc ili borba za decibely / S. Belchikov // Komponenty i tehnologii. – 2009. – № 5. – С. 139–146.
3. Bilyk O. B. Vysokostabilnyi mikrokhvylovyi henerator z pomnozhuвачem chastoty v petli FAPCh / O.B. Bilyk, S. P. Kononov // Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia " Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2021) ", Vinnytsia, 03-05 lystopada, 2021 r. – 2021.