

УДК 621.373.187

М.П. Грицык, Н.Н. Кобак, канд. техн. наук, А.О. Любченко, В.П. Петренко, С.С. Слесаренко

Моделирование широкополосного синтезатора частот

Малошумящие синтезаторы частот применяются в составе магистральных и зоновых радиорелейных линий передачи широкополосных сигналов, панорамных радиоустройствах и спектральных анализаторах, измерительных устройствах, а также в других системах спутниковой, радиорелейной и проводной связи, требующих быстрой и точной перестройки в широком диапазоне частот [1].

Основной проблемой разработки и проектирования синтезаторов частот является неизбежное увеличение выходного уровня фазовых шумов при расширении диапазона перестройки. Существующие решения этой проблемы включают в себя повышение качества (добротности) генератора управляемого напряжением, опорного генератора, уточнённый расчёт фильтра петли фазовой автоподстройки частоты, использование параллельного включения нескольких генераторов управляемых напряжением.

Целью данной работы является расширение частотного диапазона синтезаторов на основе фазовой автоподстройки частоты, что позволит перейти на более целесообразный последовательный принцип действия радиочастотных устройств связи, диагностики и контроля.

Low-noise frequency synthesizers are used in the main and zone radio relay broadband lines (TV, multichannel telephony), panoramic receivers and spectrum analyzers, measurement devices, as well as in any other systems that require fast and accurate switching in a wide frequency range [1].

The cardinal problem of design and construction of frequency synthesizer is the inevitable output noise rise when widening the frequency range. Existing solutions include increasing Q of the VCO, reference oscillator, precise PLL calculation, or using multiple VCO's for different frequency sub-ranges.

The goal of the research is a widening of the PLL synthesizers frequency range that will be able to employ the sequential mode of functioning for radio communications, diagnostics and control systems.

Введение

Синтезаторы частоты на основе фазовой автоподстройке частоты (ФАПЧ) получили большое распространение в разных отраслях современной электроники [2]. Типовые синтезаторы, использующие это метод, позволяют получить синусоидальный сигнал с частотой в гигагерцы и дискретностью менее ста герц, синхронный опорной частоте и фазовой стабильностью не хуже, чем у опорного генератора. Кроме того, синтезаторы на основе ФАПЧ обеспечивают высокую спектральную чистоту сигнала, необходимую для радиолокационной аппаратуры высокого разрешения. Среди недостатков таких синтезаторов наиболее существенными являются ограниченная скорость перестройки частоты, недостаточно широкий диапазон синтезируемых частот, сложность изготовления и настройки.

Входящий в состав любого синтезатора частот, генератор управляемый напряжением (ГУН), является элементом, определяющим важнейшие характеристики синтезатора. К нему предъявляются требования работы во всём диапазоне синтезируемых частот при малом уровне шума и побочных компонентах. Также, он должен иметь малый дрейф частоты, для того чтобы система ФАПЧ могла компенсировать уход частоты, и сохраняла устойчивость. Задача построения такого генератора, особенно на частотах выше 100 МГц, остается довольно сложной, даже при использовании современных специализированных микросхем ГУН, предназначенных для этих целей. К тому же, такие генераторы, как правило, требуют тщательной и точной настройки.

Другим источником трудностей при разработке синтезатора на основе ФАПЧ являются противоречивые требования к значению опорной частоты, на которой работает фазовый детектор. Уменьшение этой частоты приводит к уменьшению дискретности установки выходной частоты, и в то же время, увеличивает время, необходимое для её перестройки.

Построение и расчет модели синтезатора

Моделирование процессов, происходящих в синтезаторе, является важной частью его проектирования и имеет большое значение для правильного выбора параметров элементов макета. По своей сути, моделирование является

ранней стадией эксперимента, а его результаты могут значительно повлиять на дальнейший ход исследовательской работы. В данной работе для моделирования используется программный пакет Elanix SystemView.

При проектировании синтезаторов частот необходимо обеспечивать следующие основные технические требования:

- Диапазон генерируемых частот $f_{\max} - f_{\min}$
- Шаг сетки частот Δf
- Мощность генерируемых колебаний P_f
- Относительную нестабильность генерируемой частоты $\Delta f / f$
- Относительный уровень шума выходных колебаний в зависимости от частоты шумовых флюктуаций F_W :

$$\alpha(F_W) = 10 \lg \frac{P_W(F_W)}{P_f} [\text{дБ} / \text{Гц}],$$

где $P_W(F_W)$ — мощность шума в полосе 1 Гц при отстройке на частоту F_W относительно генерируемой

- Относительную мощность побочных колебаний

$$\gamma = 10 \lg \frac{P_{\text{поб}}}{P_f} [\text{дБ}]$$

- Время перестройки τ

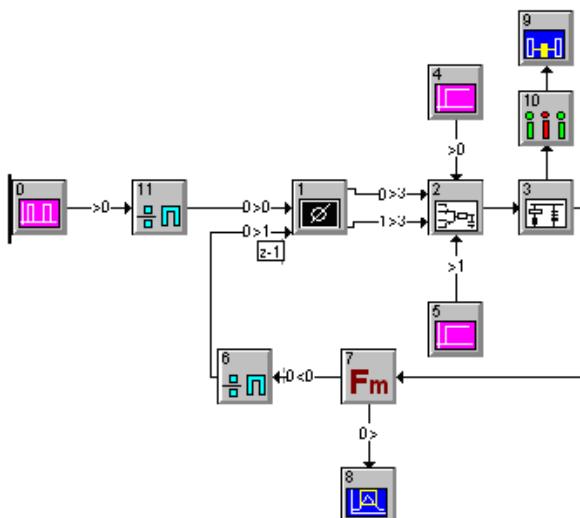


Рис. 1. Структурная схема модели синтезатора

Рассмотрим подробнее каждый элемент схемы.

Элемент 0 является импульсным источником. Служит для моделирования генератора опорного сигнала. Имеет амплитуду 1 В, частоту 10 МГц и ширину импульса 50 нс.

Элемент 11 - делитель опорного сигнала. Имеет коэффициент деления 20, не изменяю-

щийся в процессе моделирования (частота на выходе 500 кГц), уровни +1 и -1 В.

Элемент 1 – частотно-фазовый детектор, собранный на базе элементов XOR. Схема детектора, используемого в модели, показана на рис. 2.

Поскольку детектор собран на основе логических элементов, его можно охарактеризовать таблицей истинности (табл. 1).

Элемент 2 представляет собой так называемый генератор подкачки, который в реальной схеме является одной из составных частей частотно-фазового детектора (рис. 3).

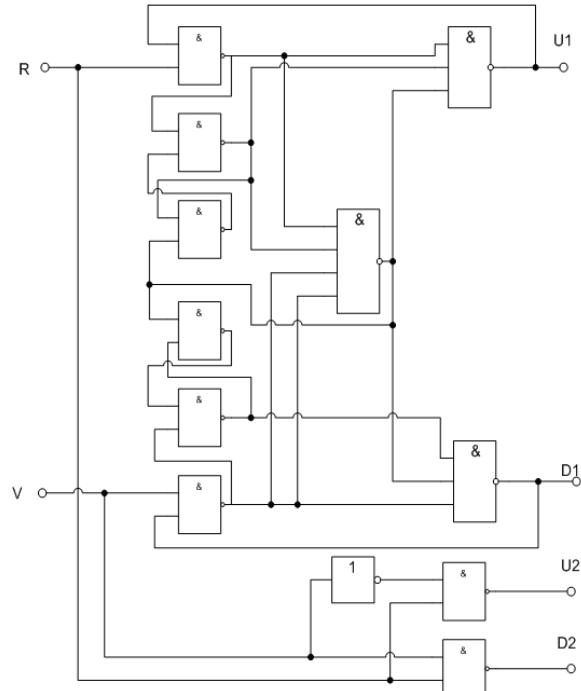


Рис. 2. Принципиальная схема частотно-фазового детектора

Табл. 1. Таблица истинности ЧФД

R	V	U ₁	D ₁	U ₂	D ₂
0	0	X	X	1	1
1	0	X	X	0	1
1	1	X	X	1	0
1	0	X	X	0	1
0	0	X	X	1	1
1	0	X	X	0	1
0	0	0	1	1	1
1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1
0	0	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1
0	0	1	0	1	1
1	0	1	0	0	1
0	0	1	1	1	1

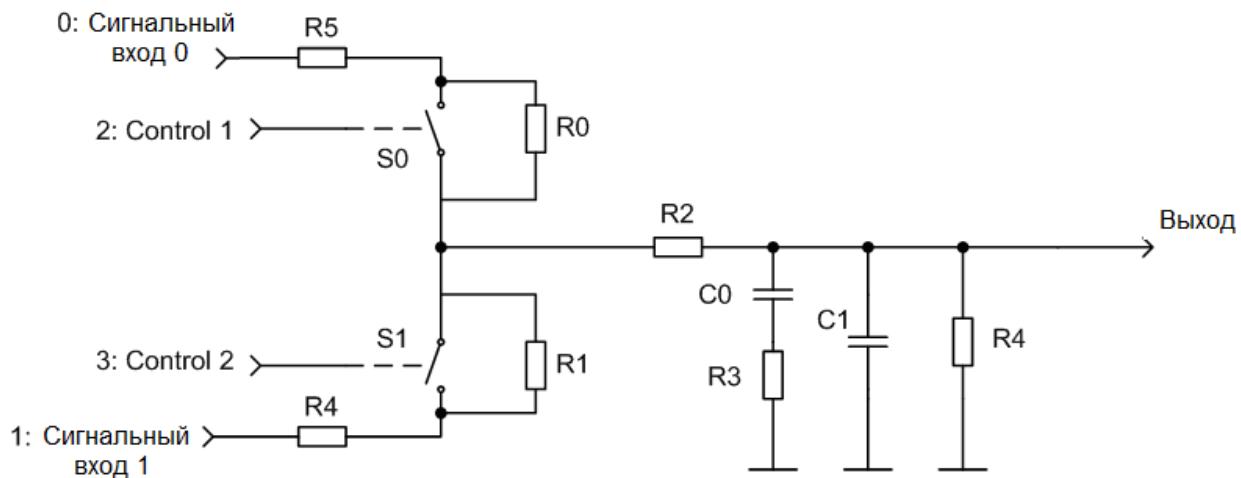


Рис. 3. Принципиальная схема генератора подкачки

Как видно из схемы, генератор состоит из двух ключей, которые управляются стоящим впереди ЧФД, резисторов R_5 и R_6 , с помощью которых моделируется управление ключами по току (ко входам «0» и «1» подаются постоянные уровни противоположных знаков), резисторов R_0 и R_1 , служащих для моделирования явления утечки (в данной модели их сопротивление стремится к бесконечности, что соответствует отсутствию утечки) и RC-фильтра низких частот, в котором происходит накопление заряда. Подбор параметров этого фильтра и следующего за ним – одна из важнейших задач в проектировании синтезатора, т.к. именно от них зависит соотношение «точность/быстродействие», а также чистота спектра выходного сигнала.

Элемент 3: RC-фильтр низких частот. Служит для дополнительной фильтрации сигнала, поступающего с генератора подкачки имеет принципиальную схему, показанную на рис. 4.

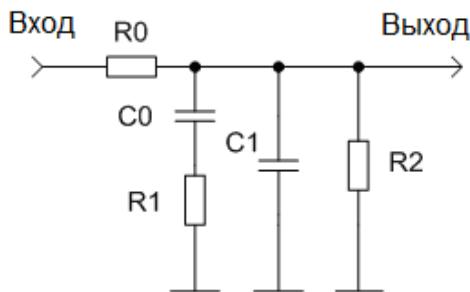


Рис. 4. Принципиальная схема RC-фильтра низких частот

В данной работе расчёт параметров элементов фильтра ведётся в соответствии с рекомендациями AN (Application Note) 1001 компании National Semiconductor и приведен в табл. 2.

Используя полученные значения, можно установить соответствующие параметры модели, которые показаны на рис. 5 и рис. 6.

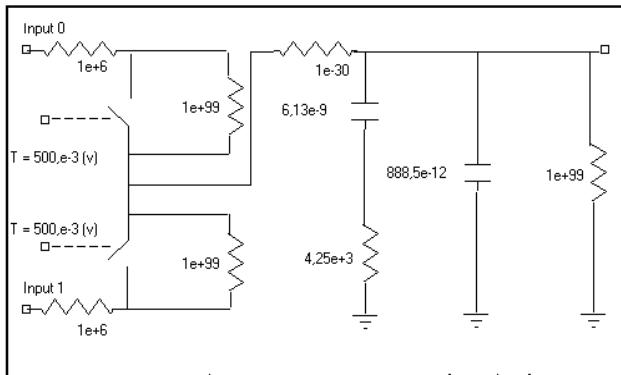


Рис. 5. Генератор подкачки с рассчитанными параметрами элементов

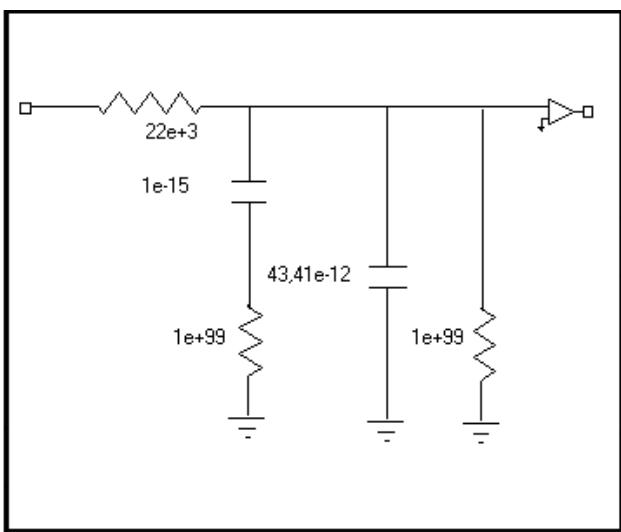


Рис. 6. ФНЧ с рассчитанными параметрами элементов

Табл. 2. Расчёт параметров элементов фильтра

Параметр	Величина	Ед.	Пояснения и вычисления
Kvco	$20 \cdot 10^6$	Гц/В	Чувствительность ГУН
Kcp	$5 \cdot 10^{-3}$	А	Входной ток генератора подкачки
RFopt	$2 \cdot 10^9$	Гц	Центральная частота ГУН
Fref	$5 \cdot 10^5$	Гц	Опорная частота
BWhz	$20 \cdot 10^3$	Гц	Ширина полосы фильтра
PhMar	45	град	Фазовый сдвиг
ATTEN	20	дБ	Искомый относительный уровень предельного шума
Lpf_R3	$20 \cdot 10^3$	Ом	Сопротивление входного резистора доп. RC-фильтра
<i>Рассчитанные параметры элементов генератора подкачки и ФНЧ</i>			
N	$4 \cdot 10^3$		Коэффициент деления $N = (RFopt/Fref)$
Ctog	$888,54 \cdot 10^{-12}$	Ф	Ёмкость, включенная на землю С1 (генератор подкачки (ГП))
Cwsr	$6,13 \cdot 10^{-9}$	Ф	Ёмкость, включенная последовательно с резистором С2 (ГП)
Rwsc	$4,25 \cdot 10^3$	Ф	Резистор, включенный последовательно с ёмкостью R2 (ГП)
Lpf_C3	$43,41 \cdot 10^{-12}$	Ф	Ёмкость, включенная на землю(С3). (ФНЧ)
<i>Рассчитанные параметры источника тока</i>			
Rcp	10^6	Ом	Входные резисторы генератора подкачки $Rcp = 5000/Kcp$
<i>Промежуточные вычисления</i>			
BWrad	125 664	Рад	Ширина полосы пропускания в радианах=(2pix BWhz)
T1calc	$3,296 \cdot 10^{-6}$	С	$T1 = (1/\cos PhMar) - \tan PhMar / BWrad$
T3calc	$9,549 \cdot 10^{-7}$	С	$T3 = \sqrt{(10 \exp((ATTEN/20) - 1)/(2\pi \cdot Fref) \cdot 2)}$
<i>Расчёт ширины полосы пропускания</i>			
BWcalcLT	$4,251 \cdot 10^{-6}$		$BWcalcLT = \tan PhMar \cdot (T1calc + T3calc)$
BWcalcLB	$2,122 \cdot 10^{-11}$		$BWcalcLB = ((T1calc + T3calc)^2 + (T1calc \cdot T3calc))$
BWcalcRT	$2,122 \cdot 10^{-11}$		$BWcalcRT = BWcalcLB$
BWcalcRB	$1,807 \cdot 10^{-11}$		$BWcalcRB = BWcalcLT^2$
BWcalc	$9,506 \cdot 10^4$	Гц	$BWcalc = (BWcalcLT / BWcalcLB) \cdot \sqrt{1 + (BWcalcRT / BWcalcRB)} - 1$
T2calc	$2,603 \cdot 10^{-5}$	С	$T2calc = 1 / ((BWcalc^2) \cdot (T1calc + T3calc))$
<i>Расчёт C1</i>			
CtogLT	10^5		$CtogLT = Kcp \cdot Kvco$
CtogLB	$3,614 \cdot 10^{13}$		$CtogLT = (BWcalc)^2 \cdot N$
CtogRT	7,123		$CtogRT = (1 + (BWcalc)^2 \cdot (T2calc)^2)$
CtogRB	1,107		$CtogRB = (1 + (BWcalc)^2 \cdot (T1calc)^2) \cdot (1 + (BWcalc)^2 \cdot (T3calc)^2)$
Ctog	$8,89 \cdot 10^{-10}$	Ф	$Ctog = (T1calc / T2calc) \cdot (CtogLT / CtogLB) \cdot \sqrt{(CtogRT / CtogRB)}$
<i>Расчёт C2</i>			
Cwsr	$6,13 \cdot 10^{-9}$	Ф	$Cwsr = Ctog \cdot ((T2calc / T1calc) - 1)$
<i>Расчёт R2</i>			
Rwsc	4247,6	Ф	$Rwsc = T2calc / Cwsr$
<i>Расчёт C3</i>			
Lpf_C3	$43,41 \cdot 10^{-12}$	Ф	$Lpf_C3 = T3calc / Lpf_R3$

Особенности моделирования синтезаторов частоты на основе ФАПЧ

Существует множество программных средств моделирования, среди которых можно выделить пакеты Mathsoft Simulink и Eagleware/Elanix SystemView. Оба пакета предоставляют возможность наглядного построения модели на основе базовых блоков (генераторы, фильтры и т.п.). Однако, в общем случае, эти элементы являются идеальными, что не позволяет точно отразить особенности того или иного устройства. Кроме того, использование численных методов расчёта, а также ограниченность временной реализации моделируемых процессов приводит к появлению неточностей [3].

Основной проблемой при анализе выходного сигнала синтезатора является так называемая утечка спектра, возникающая из-за того, что при ДПФ предполагается, что последовательность отсчётов анализируемого сигнала является периодически продолженной вперёд и назад во времени. Кроме того, резкие изменения час-

тоты сигнала вследствие переходного процесса при переключении ГУН, имеющие место в начале временного отрезка, оказывают существенное влияние на спектр сигнала на выходе.

Стандартным методом борьбы с явлением утечки является использование весовых функций, также называемых взвешивающими окнами. Смысл их использования состоит в том, что перед расчётом ДПФ сигнал умножается на весовую функцию, которая имеет спад по краям сегмента.

Для дальнейшего сглаживания полученного спектра можно использовать функцию скользящего усреднения, которая уменьшает влияние аperiодических компонент.

Другим способом избежать попадания в спектр сигнала нежелательных компонент является использование для исследования не всей реализации полученного сигнала, а лишь той его части во временной области, которая будет поступать (коммутироваться) на выход предполагаемого реального устройства. Таким образом, снижается влияние переходного процесса [4].

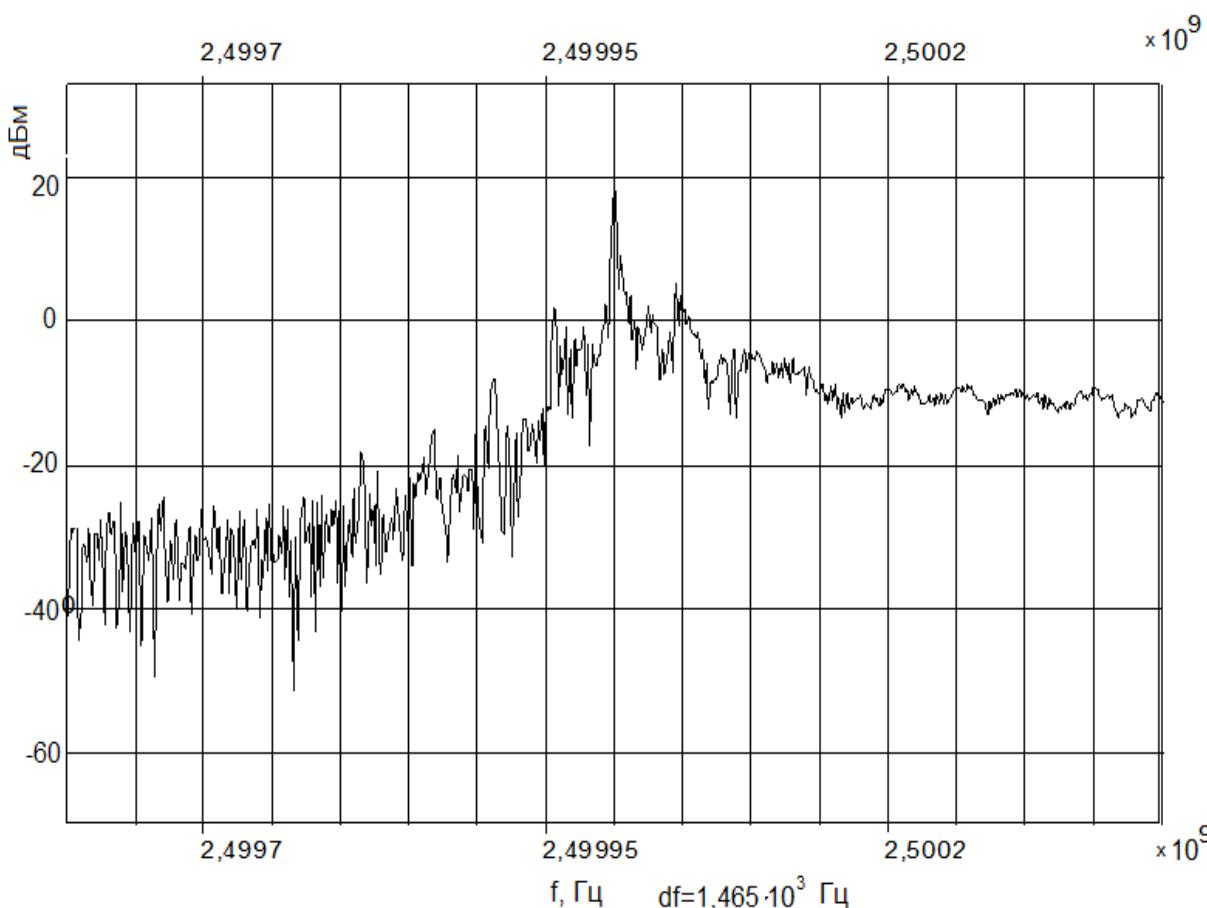


Рис. 7. Спектр сигнала в области центральной частоты

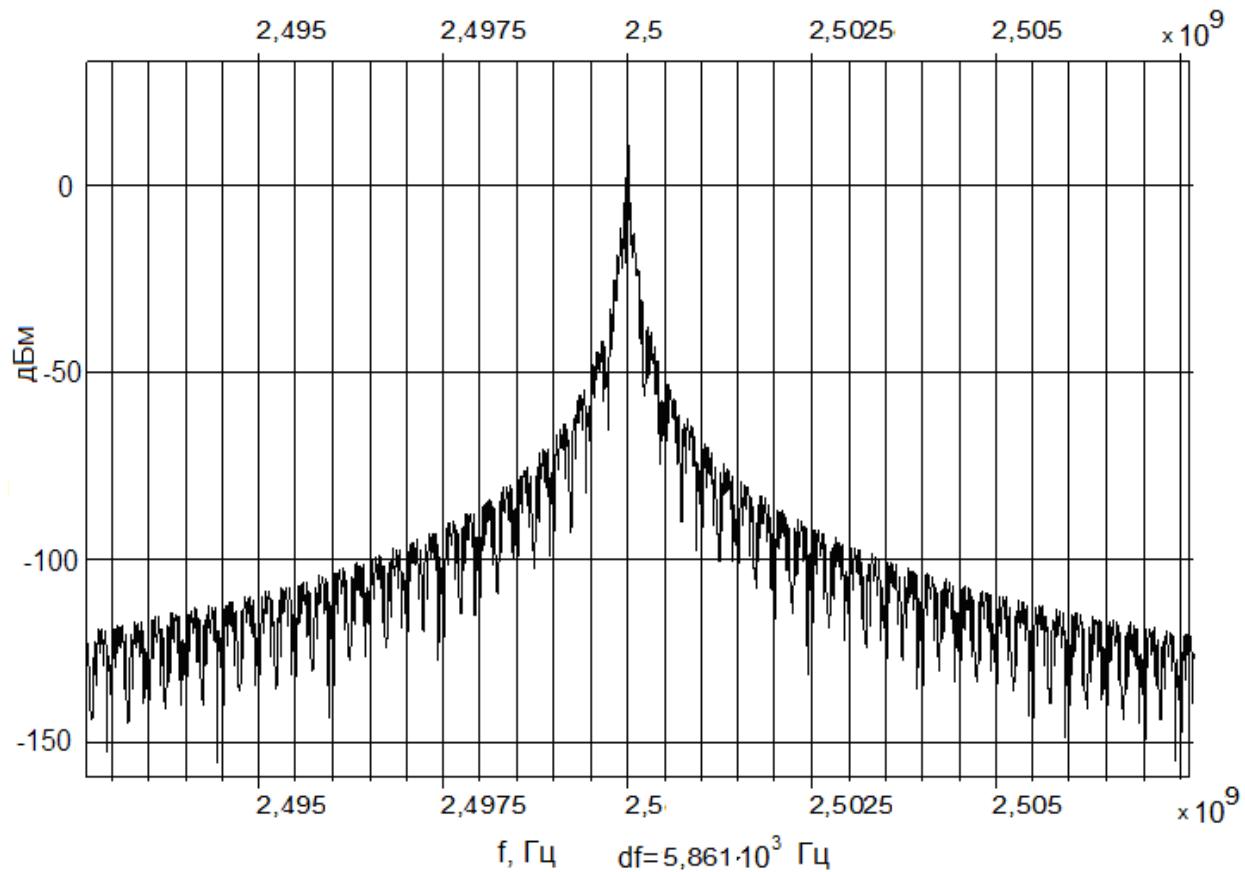


Рис.8. График спектра сигнала в интервале 400..500 мкс, умноженного на весовую функцию Elanix (3,76)

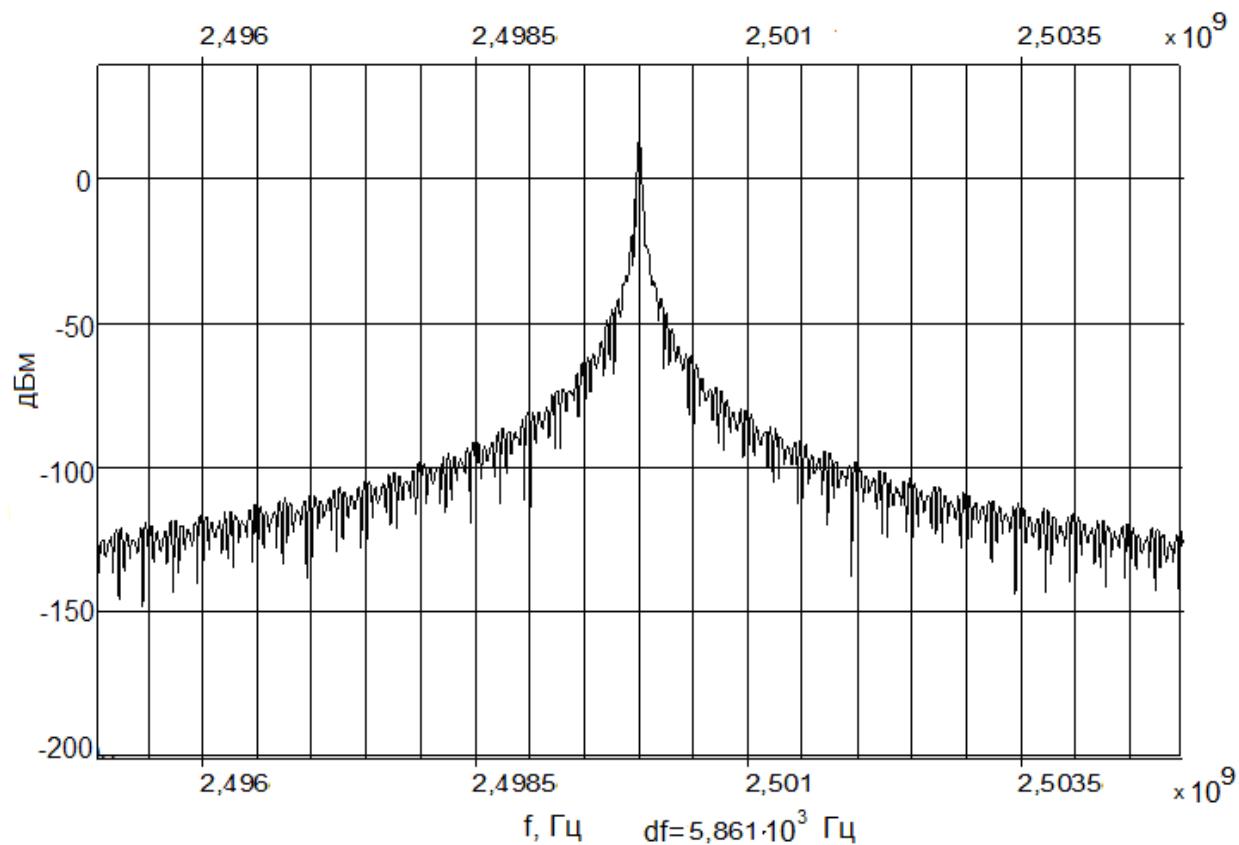


Рис.9. Фрагмент спектра сигнала после уточнения параметров петлевого фильтра

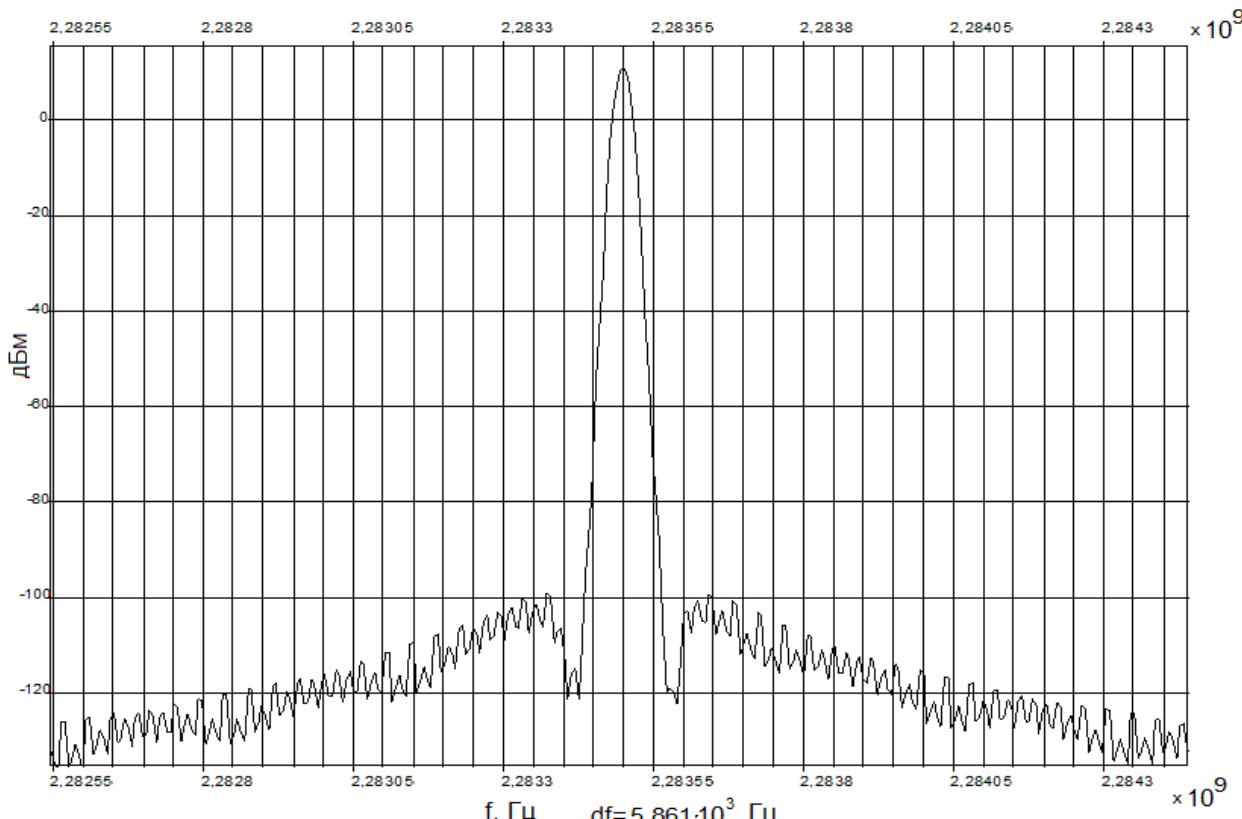


Рис.10. Спектр выходного сигнала после введения интеграторов в цепь управления

Выводы

Изучив основные характеристики синтезаторов на основе ФАПЧ, можно прийти к выводу, что такой тип синтезатора в значительной степени соответствует требованиям, ранее поставленным к генераторам ЛЧМ сигналов. Современные системы ФАПЧ на основе ИМС имеют возможность программного управления. То есть, задавая с помощью устройства управления параметры синтезатора, и изменяя их по определённому закону, на выходе можно получить сигнал с аналогичным законом изменения частоты.

Разработка контурного фильтра является одним из наиважнейших этапов проектирования, поскольку именно он определяет соотношение между быстродействием системы и уровнем фазовых шумов на выходе.

Для получения корректных результатов при компьютерном моделировании синтезатора, необходимо выполнить ряд условий, в числе которых: исключение влияния апериодических составляющих на спектр выходного сигнала путём применения взвешивающих окон, использование оптимального отрезка временной реализа-

ции сигнала, а также усреднение полученных результатов. Однако, при использовании описанных методов исследования следует также принимать во внимание особенности конкретной модели, такие как длительность переходного процесса и полоса пропускания фильтра ФАПЧ.

Литература

1. Романюк А.А. Синтезаторы частот на основе автогенераторов с ФАПЧ [Текст]: Учебное пособие / М.: МИЭТ, 2005г. – 100 с
2. Н.Н.Кобак, С.С.Слесаренко. Микроволновые компоненты многофункциональных информационных систем // Электроника и связь. Киев, 2008, № 1, С. 261-263
3. Microwave Projects 2 [Text] / RSGB 2005. - Paperback.—240 by 175 mm.—216 pages.
4. О. Стариков. Базовая схема, конструктивные блоки и шумовые характеристики ФАПЧ синтезаторов частоты [Електронний ресурс]: ChipNews №7/2001г. / Електрон. журн.— Спосіб доступу: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200107/2.html>, вільний.—Назва з екрану.—Мова рос.