

2. Хмель В.Ф. Антенны и устройства СВЧ / В.Ф.Хмель, А.Ф.Чаплин, И.И.Шумлянский. – К.: Высшая школа, 1990. – 232с.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Сазонов Д.М. – М.: Высшая школа, 1988. – 427с.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Галлагер Р.; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428с.
5. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е.Банков, А.А.Курушин, В.Д.Разевиг. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 283с.
6. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / под ред. В.В.Никольского. – М.: Радио и Связь, 1982. – 272с.
7. Гупта К. Машинное проектирование СВЧ структур / К.Гупта, Р.Гардж, Р.Чадха. – М.: Радио и Связь, 1987. – 432с.
8. Гвоздев В.И. Объемные интегральные схемы СВЧ / Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. – М.: Наука, 1987. – 108с.

Надійшла до редколегії 16.03.2016.

УДК 621.373.52

ДЕРНОВИЙ В.А., студент  
ГНАТЮК М.О., інженер  
С'ЯНОВ О.М., д.т.н, професор

Дніпродзержинський державний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ

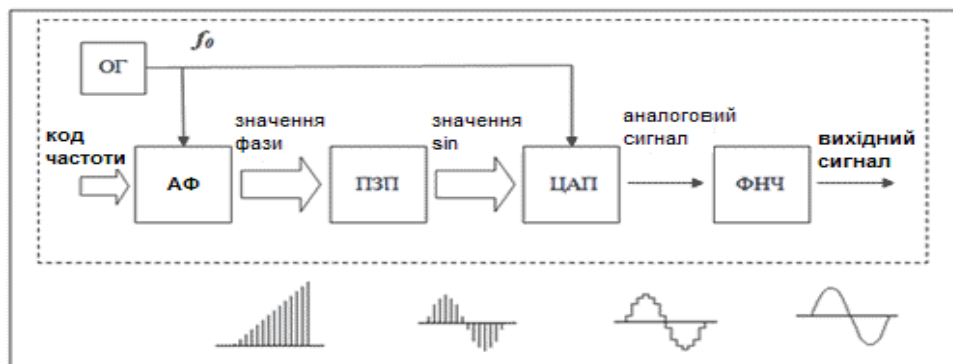
**Вступ.** Загальною тенденцією сучасної радіотехніки є перехід від простих до складних видів сигналів з кутовою модуляцією і змінюваними за законом заданої кодової послідовності параметрами. При цьому вимоги до точності і стабільності параметрів формованих сигналів постійно підвищуються. Традиційні аналогові методи формування складних сигналів в ряді випадків не задовольняють збільшеним вимогам, що і визначило інтерес до цифрових пристроїв формування, званих надалі цифровими синтезаторами частоти.

Їх інтенсивний розвиток пов'язано з появою процесорів для обробки складних сигналів, вдосконаленням великих інтегральних схем і запам'ятовуючих пристроїв, швидкодіючих цифро-аналогових перетворювачів. Цифрові методи формування забезпечують когерентність, високу довготривалу стабільність і повторюваність параметрів сигналів, а також добру відтворюваність характеристик при серійному виготовленні. Крім того, вони дозволяють не тільки змінювати параметри формованих сигналів (девіацію частоти і тривалість), але і вводити в сигнал необхідні передспотворення. У зв'язку з цим доцільність застосування цифрових методів формування складних сигналів в сучасних радіотехнічних системах не викликає сумнівів.

На даний час для формування гармонійних коливань широко використовуються синтезатори прямого цифрового синтезу з дискретним відліком частоти. З їх допомогою можливе формування різних складних сигналів. Однак, недостатня вивченість спотворень частотно-часової структури, що виникають при перемиканні частот з одного боку, і відсутність єдиного підходу до аналізу характеристик всього різноманіття зазначеного класу синтезаторів з іншого боку, стримує їх широке застосування.

**Постановка задачі.** Сучасний DDS-синтезатор містить: 1) опорний генератор; 2) дільник частоти; 3) акумулятор фази; 4) постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), що містить перекодовочну таблицю (Look Up Table); 5) цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП); 6) фільтр нижніх частот (ФНЧ) (anti-aliasing filter) [1].

Акумулятор фази формує адресу для ПЗП, куди записана таблиця одного періоду функції  $\sin$ ; відліки з виходу ПЗП надходять на ЦАП, який формує на виході синусоїдальний сигнал, що піддається фільтрації в ФНЧ і поступає на вихід. Для перебудови вихідної частоти використовується дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення, на вхід якого надходить тактовий сигнал з опорного генератора [2]. Схема такого синтезатора зображена на рис.1.

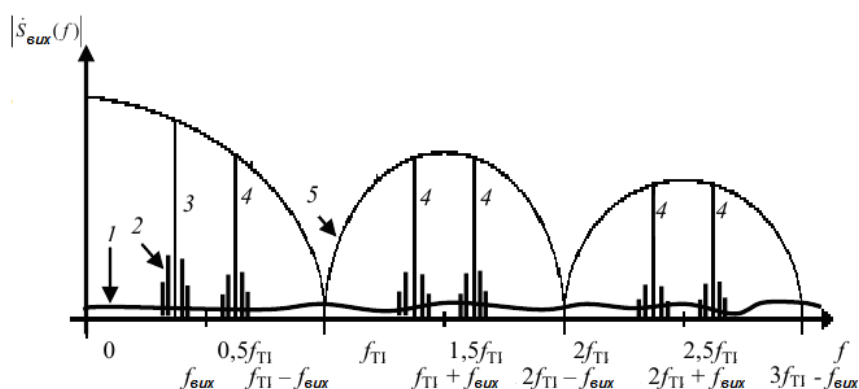


ОГ – опорний генератор, АФ – акумулятор фази, ПЗП – постійний запам’ятовуючий пристрій, ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач, ФНЧ – фільтр нижніх частот

Рисунок 1 – Структура та принцип дії DDS-синтезатора.

Основні параметри для синтезаторів DDS – це фазовий шум, тремтіння фронтів (джиттер) і SFDR (Spurious-Free Dynamic Range – динамічний діапазон, вільний від гармонік). Основним джерелом фазового шуму та джиттеру є опорний генератор; щоб мінімізувати величину цих параметрів, необхідно вибрати стабільне джерело тактових імпульсів, уникати сигналів з повільними фронтами і схем з низькою швидкістю наростання імпульсів та працювати при максимально можливій частоті тактування, щоб мати достатньо великий запас по частоті. SFDR (динамічний діапазон, вільний від гармонік) являє собою співвідношення (у децибелах) між величиною основного сигналу і величиною максимального піку в спектрі вихідного сигналу, включаючи гармоніки, інтермодуляційні складові і продукти накладення спектрів (рис.2) [3].

Для компенсації гармонік, що викликаються усіканням коду фази, в синтезаторах



- 1 – фазовий шум і шум квантування; 2 – гармоніки, викликані усіканням коду фази; 3 – основна гармоніка;
- 4 – копії основної гармоніки; 5 – обгинальна

Рисунок 2 – Додаткові побічні компоненти спектра

застосовують так звані інверсні sinc-фільтри. Високочастотні копії знаходяться за межами смуги Найквіста ( $0 \dots 0,5f_{T1}$ ) і можуть бути придушені аналоговим фільтром нижніх частот, включеним після ЦАП.

Метою даної роботи є формування радіосигналів з використанням DDS синтезаторів. Тому задача роботи – промоделе-

лювати роботу синтезатора в середовищі NI LabView, дослідити роботу моделі, за результатами дослідження сконструювати реальну модель, дослідити її роботу та порівняти результати.

У ролі синтезуючого пристрою використовується синтезатор прямого цифрового синтезу AD9850 фірми Analog Devices, оскільки він здатний генерувати гармонічні хвилі частотою до 62,5 МГц, що задовольняє умовам задачі, і при цьому є однією з найбільш поширених недорогих мікросхем ПЦС.

**Результати роботи.** Відповідна до рис.1 схема синтезатора прямого цифрового синтезу в середовищі LabView зображена на рис.3 [4].

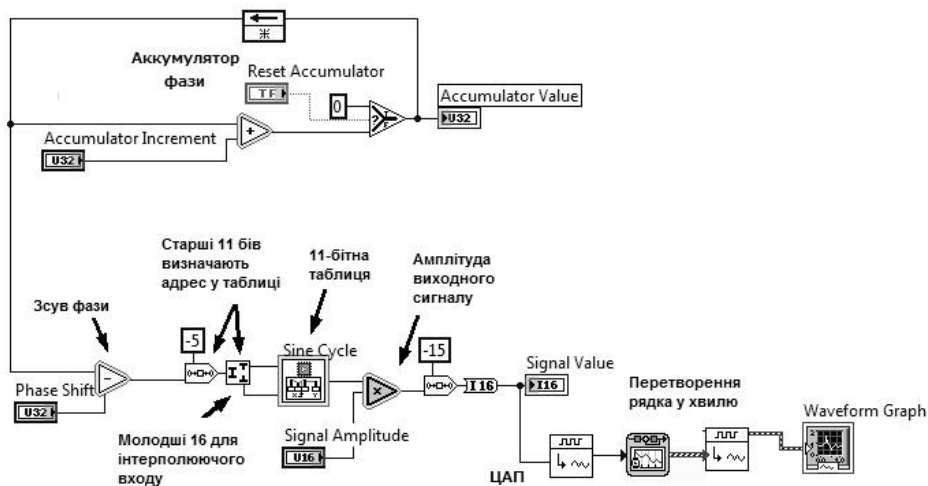
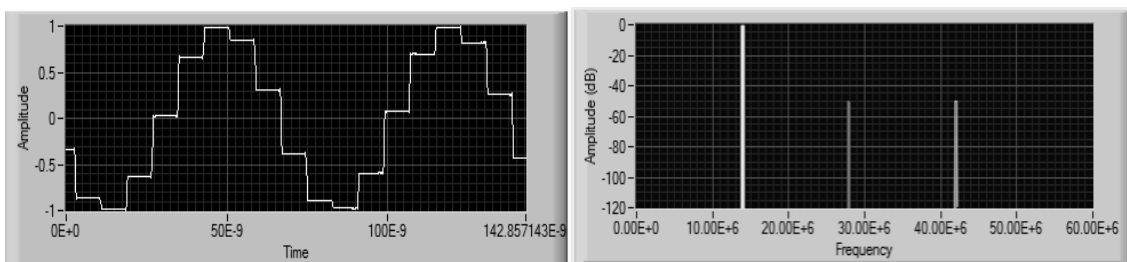
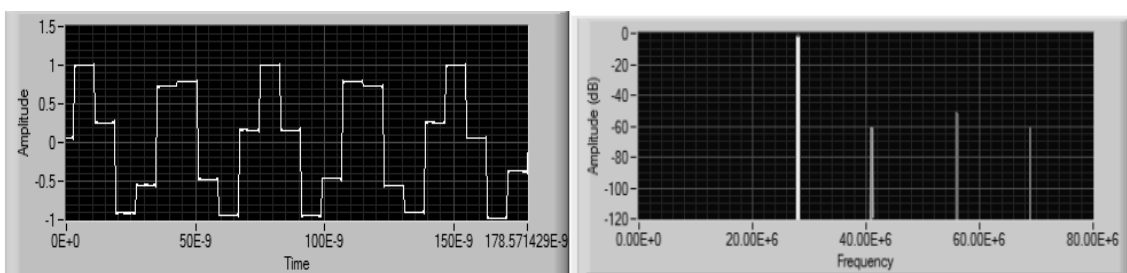


Рисунок 3 – Цифровий синтезатор в системі програм NI LabView

У результаті моделювання були отримані характеристики (форми і спектри) моделі при генеруванні хвиль з частотою 14МГц (а) і 28МГц (б) без використання вихідного фільтра нижніх частот, зображені на рис.4.



а)

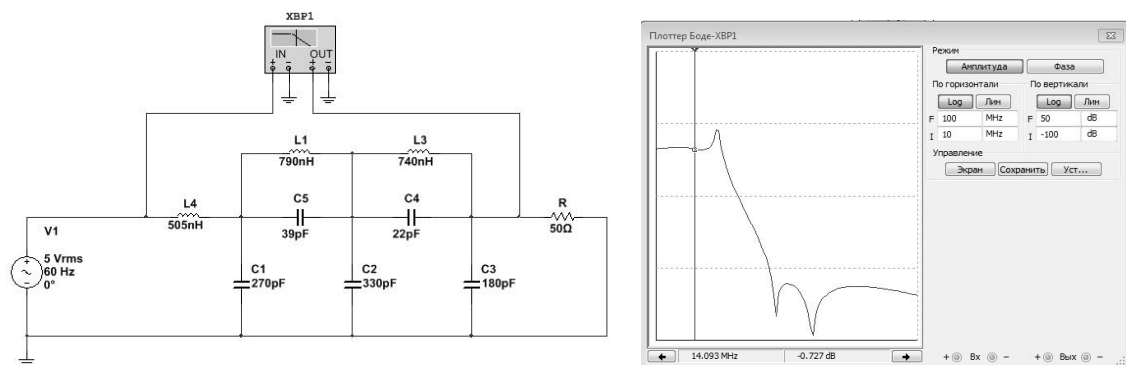


б)

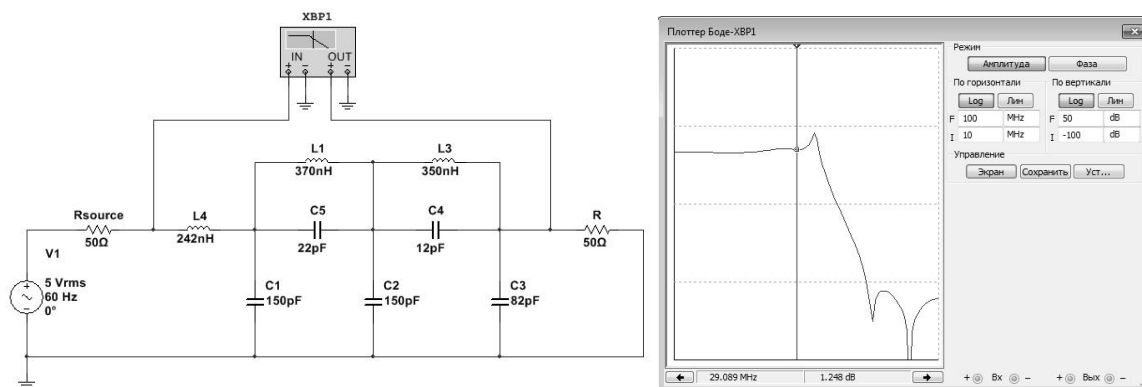
Рисунок 4 – Результат моделювання

Копії основної гармоніки виникають на частотах  $f_{out} * n$ , де  $n = 2, 3, 4, \dots$ . Виходячи з цього, характеристики АЧХ ФНЧ для кожного діапазону повинні відповідати наступним: для 14Мгц: смуга пропускання 15Мгц, придушення на частоті 28Мгц не менше 60дБ; для 28Мгц: смуга пропускання 30Мгц, придушення на частоті 60Мгц не менше 60дБ.

Згідно з розрахунками цим вимогам відповідають такі топології фільтрів: 1) фільтр Баттерворта 11 порядку, 2) фільтр Чебишева 8 порядку, 3) еліптичний фільтр (фільтр Кауера) 6 порядку. Для моделювання обрано фільтр Кауера, так як він потребує меншої кількості ланок за відсутності значних погіршень характеристик фільтра. Розраховані фільтри були промодельовані в середовищі NI Multisim, що дало змогу виміряти їх АЧХ та переконатися, що вони відповідають зазначеним вище (рис.5).



а)



б)

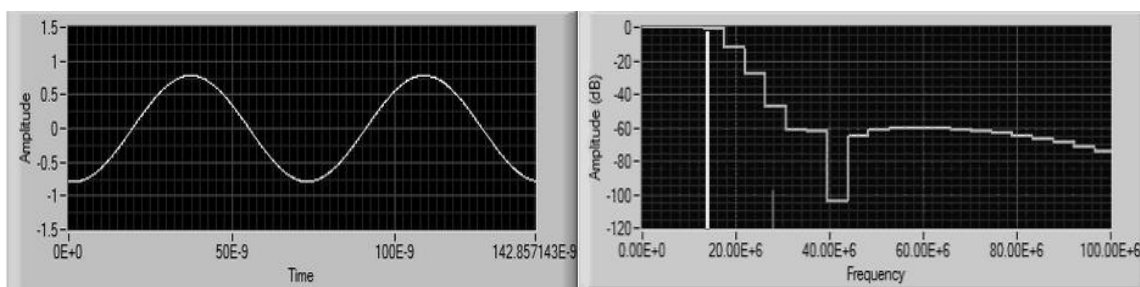
Рисунок 5 – Розраховані еліптичні ФНЧ 6 порядку зі смугою пропускання 19Мгц (а) та 30 Мгц (б)

Вищенаведені моделі фільтрів були відповідно перетворені для використання у середовищі LabView (рис.6).

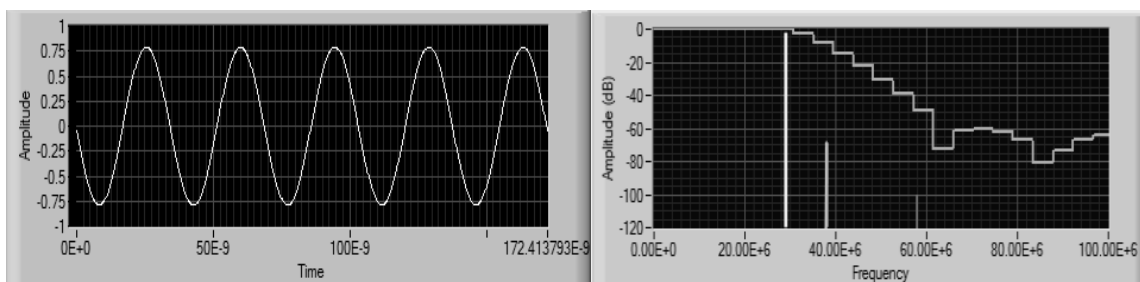


Рисунок 6 – Цифровий синтезатор з ФНЧ

Результати дослідження DDS при фільтрації вихідного сигналу фільтрами низьких частот зображені на рис.7, а) (14 МГц) і 7, б) (28 МГц).



а)



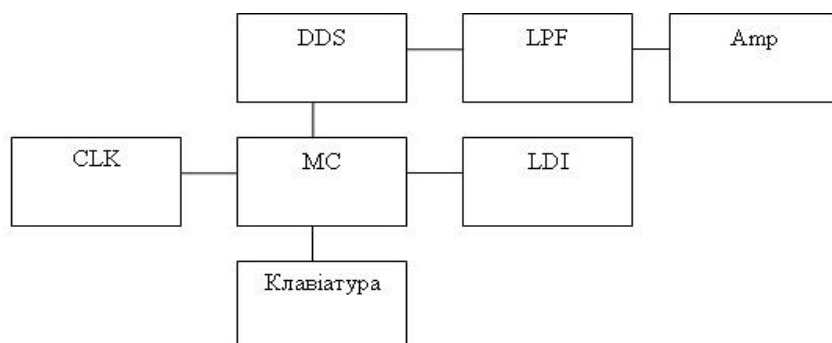
б)

Рисунок 7 – Форма (а) і спектр (б) профільтованого сигналу

Як видно з графіків, розроблені фільтри низьких частот хоча й аттенюють основний сигнал (спостерігається ослаблення в  $\sim 0.9$ дБ для сигналу частотою 14МГц і  $\sim 1.93$ дБ для сигналу частотою 28МГц), тим не менш достатньо ефективно фільтрують паразитні дзеркальні гармоніки, покращуючи шумові характеристики синтезатора і дозволяючи застосовувати його в пристроях, що вимагають високої стабільності частоти.

Проведене дослідження у середовищах моделювання NI LabView та NI Multisim дозволило розробити експериментальну модель цифрового синтезатора.

Синтезатор складається зі зв'язки мікроконтролера, плати цифрового синтезатора частоти і рідкокристалічного індикатора і являє собою універсальний блок для застосування в радіотехнічних конструкціях в якості класичного генератора плавного діапазону з будь-якою ПЧ [5].



DDS – пристрій ПЦС, LPF – ФНЧ, Amp – підсилювач,  
 CLK – тактовий генератор, MC – мікроконтролер,  
 LDI – рідкокристалічний індикатор

Рисунок 8 – Структурна схема пристрою

Структурну схему пристрою наведено на рис.8, а повну – на рис.9.

На рис.10 зображено форму сигналу синтезатора при роботі в діапазоні 14 МГц. Встановлена частота –14.2 МГц. Верхнє зображення ві-

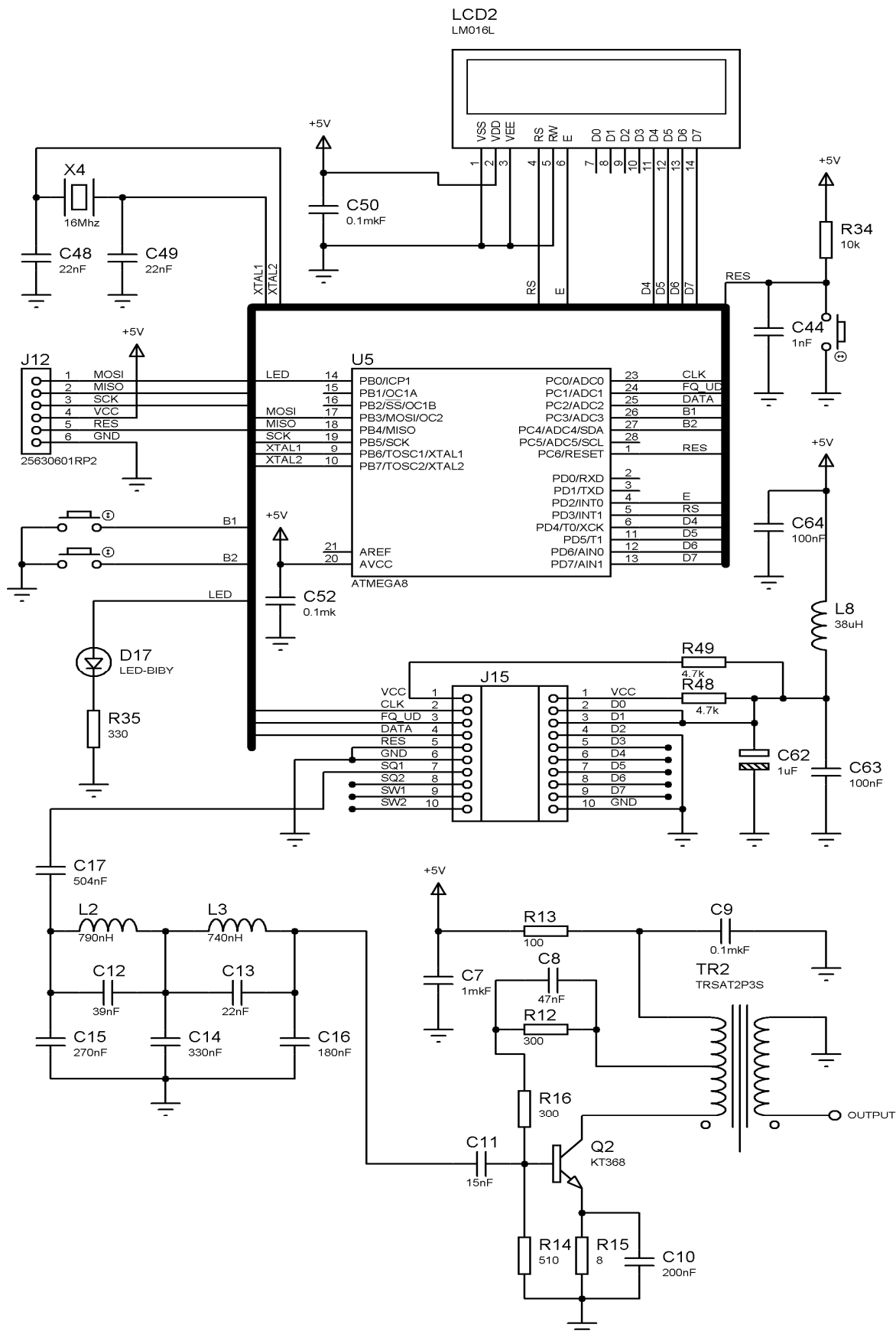


Рисунок 9 – Повна схема пристрою

дображає сигнал, що виходить прямо з DDS, нижнє – сигнал, додатково оброблений розробленим ФНЧ.

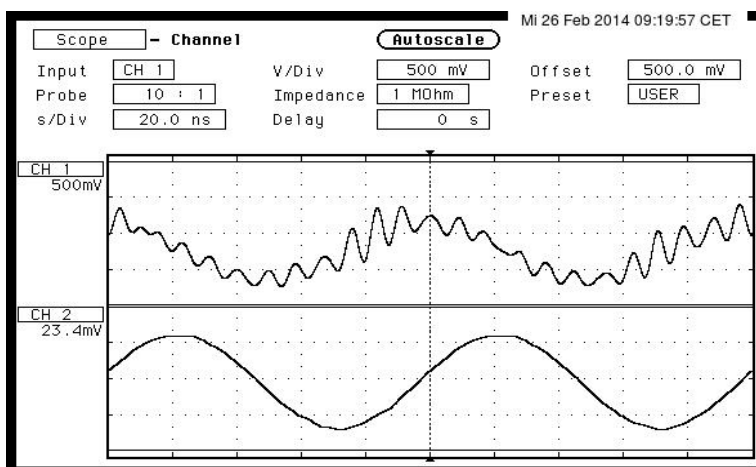


Рисунок 10 – Форма нефільтрованого і фільтрованого сигналу на частоті 14 МГц

На рис.11 зображено аналогічну форму сигналу для синтезатора 28 МГц. Встановлена частота – 28.8 МГц.

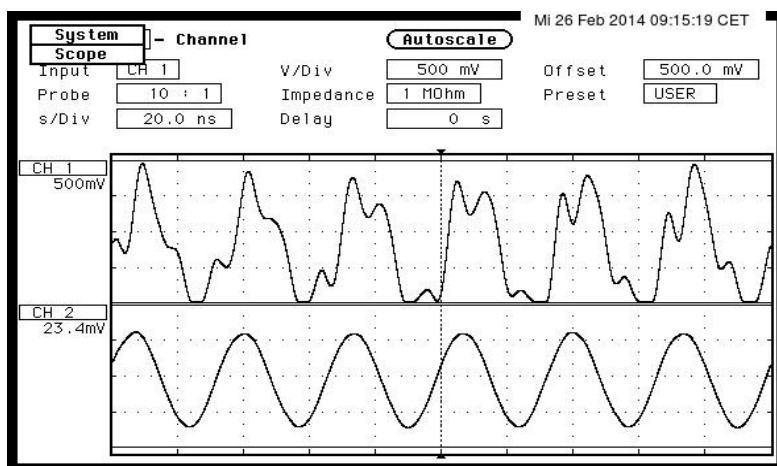


Рисунок 11 – Форма нефільтрованого і фільтрованого сигналу на частоті 28 МГц

**Висновки.** Розроблена віртуальна модель прямого цифрового синтезатора в середовищі NI LabView дозволила проаналізувати форму та спектр генерованого гармонійного коливання та визначити необхідні параметри фільтрів нижніх частот для його обробки; згідно з результатом моделювання розраховані та промодельовані в програмі NI Multisim відповідні еліптичні фільтри 6-го порядку, а також досліджено їх вплив на генерований сигнал за допомогою методу взаємосимуляції між NI LabView та NI Multisim. За отриманими результатами розроблено та досліджено експериментальну модель на основі сучасного пристрою прямого цифрового синтезу DDS AD9850. Її шумові характеристики склали: остаточний фазовий шум -110 dB; SFDR: -60 dB при частоті 14 MHz, -80 dB при частоті 28 MHz.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Маннасевиц В.А. Синтезаторы частот (теория и проектирование) / В.А.Маннасевиц; пер. с англ. под ред. А.С.Галина. – М.: Связь, 1979. – 384с.

2. Синицын В.А. Прямой цифровой синтезатор сигналов: практическое пособие. / В.А.Синицын, А.Л.Беседа, М.В.Зубков. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2011. – 33с.
3. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 1999. – Режим доступа: [http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/450968421DDS\\_Tutorial\\_rev12-2-99.pdf](http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf)
4. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С.Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208с.
5. CMOS 125MHz Complete DDS Synthesizer AD9850. Datasheet [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 2004. — Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>

Надійшла до редколегії 21.12.2016.

УДК 539.216.2

ТАРАН В.Г., к.ф.-м., доцент  
ТУРЧЕНКО Ю.О., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТИТАНАТА БАРИЯ ИЗ РАСПЛАВА С ИЗБЫТКОМ РУТИЛА

**Введение.** Для решения задач современной электроники, радиотехники, нелинейной оптики и управления лазерным излучением актуальной является проблема получения новых материалов с уникальными электрофизическими и оптическими свойствами, к которым относится стехиометрический титанат бария [1-3].

**Постановка задачи.** Стехиометрический титанат бария ( $BaTiO_3$ ) обладает необходимыми для применения нелинейными свойствами в кубической и тетрагональной фазах, существующих при температурах ниже  $1460^{\circ}C$ . Однако температура плавления этого соединения, необходимая для кристаллизации, значительно выше ( $1618^{\circ}C$ ). При ней существует необратимая гексагональная модификация, в которой эти свойства отсутствуют [4]. Для обхода этой модификации возможен метод выращивания  $BaTiO_3$  из расплава нестехиометрического состава титаната бария с избытком рутила [5]. Он требует выполнения целого ряда условий температурного режима и следования диаграмме фазового равновесия компонентов среды образования кристаллов при механическом извлечении стехиометрического монокристалла. Исследование процесса выращивания объемных монокристаллов  $BaTiO_3$  из расплава системы  $BaTiO_3 - TiO_2$  является задачей настоящей работы.

**Результаты работы.** Основу ростового цикла для материала сложной системы составляет согласование динамики снижения температуры маточного расплава в соответствии с фазовой диаграммой компонентов загрузки  $BaTiO_3 - TiO_2$  и скорости механического извлечения монокристалла стехиометрического титаната бария ( $BaTiO_3$ ) необходимой кристаллической модификации. Это позволяет выбрать на затравку из фиксированного объема расплава максимальное количество требуемого материала. Так как температура гексагонального фазового перехода  $1450^{\circ}C$ , то кристаллизацию необходимо производить ниже этой границы.

Возможны два варианта подготовки шихты: 1) исходные порошки  $TiO_2$  и  $BaO$ ; 2) порошки  $TiO_2$  и  $BaTiO_3$ . На наш взгляд, более эффективным является второй вариант – смесь  $TiO_2$  и  $BaTiO_3$ , в котором соотношение молярных компонент исходной