

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ В ЧАСТОТНИХ АНАЛІЗАТОРАХ ІМПЕДАНСУ

О Хома Ю.В., 2010

Обґрунтовано доцільність застосування засобів прямого цифрового синтезу в частотних аналізаторах імпедансу. Наведено структуру та описано принцип роботи цифрового синтезатора гармонічних сигналів. Проаналізовано причини виникнення паразитних гармонік та їх дестабілізуючий вплив на точність аналізаторів імпедансу.

Direct Digital Synthesis devices application advisability in impedance frequency analyzer is grounded in the article. Structure and operation principle of digital synthesizer of harmonic signals are given. Parasitic harmonics origination and their destabilizing impact on impedance frequency analyzer accuracy are analyzed.

Принцип побудови частотних аналізаторів імпедансу. Сьогодні потреба вимірювання імпедансу виникає у найрізноманітніших сферах – хімії, медицині, екології, фізиці напівпровідників, матеріалознавстві. При цьому опосередковано здійснюється контроль різноманітних фізичних величин, наприклад, вологості, корозії, якщо відома залежність цієї величини від імпедансу. Оскільки реальні досліджувані об'єкти (ДО) описуються переважно багатоелементними схемами заміщення, то їх параметри можна визначити, опрацювавши результати вимірювання складових імпедансу на низці частот. Для реалізації цього завдання використовують частотні аналізатори імпедансу (ЧАІ).

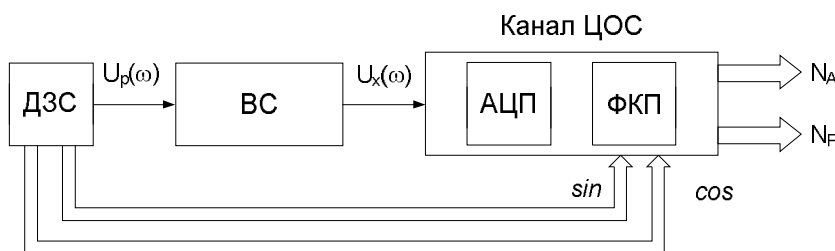


Рис. 1. Структура частотного аналізатора імпедансу
на основі цифрового опрацювання сигналів

ЧАІ, по суті, є вимірювачами імпедансу з можливістю переналаштування зондувального сигналу та вимірювального каналу за частотою. При побудові ЧАІ аналогову частину вимірювального каналу намагаються мінімізувати, оскільки цифрова техніка забезпечує вищу стабільність на тлі дестабілізуючих впливів, гнучкість зміни параметрів вимірювального тракту, точність формування і розклад сигналів у ортогональному базисі. Аналоговою залишається вимірювальна схема, оскільки саме тут забезпечується перетворення імпедансу як пасивної величини на пропорційну комплексну напругу. До складу ЧАІ на основі цифрового опрацювання сигналів (рис. 1) входять: джерело зондувального гармонічного сигналу (ДЗС), аналогова вимірювальна схема (ВС) і канал цифрового опрацювання сигналів (ЦОС) у складі аналого-цифрового (АЦП) і фазоквадратурного перетворювачів (ФКП).

Вибір джерела зондувального сигналу. Важливим кроком під час побудови частотного аналізатора імпедансу є вибір джерела зондувального сигналу, до якого ставляться вимоги гнучкого переналаштування частоти в широкому діапазоні при збереженні високої стабільності. Найпоширенішими методами синтезу є [1]:

- прямий аналоговий синтез на основі структури змішувач/фільтр/подільник;
- непрямий аналоговий синтез на основі фазового автоматичного підналаштування частоти (Phase Locked Loop);
- класичний цифровий синтез на основі двійкового лічильника, постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) та цифроаналогового перетворювача (ЦАП);
- прямий цифровий синтез (Direct Digital Synthesis, DDS) з використанням надвисоко-розрядного акумулятора фази.

При прямому аналоговому синтезі вихідну частоту отримують безпосередньо із опорних частот за допомогою операцій змішування, фільтрації, множення або ділення. Основний недолік прямого аналогового синтезу полягає в тому, що розширення діапазону й ущільнення сітки частот потребує збільшення кількості опорних генераторів.

При непрямому синтезі на основі фазового автоматичного підналаштування частоти вихідний сигнал формується додатковим генератором, охопленим контуром зворотного зв'язку. Основними недоліками цього методу є значний рівень фазових шумів та складність отримання дрібного кроку переналаштування за частотою. Крім того, наявність зворотного зв'язку істотно обмежує швидкість генератора.

У класичному цифровому синтезаторі вихідний сигнал формується цифроаналоговим перетворювачем на основі вихідного коду ПЗП, що містить значення функції синуса. Швидкість опитування двійковим лічильником запам'ятовуючого пристрою визначає частоту синтезованого сигналу. Оскільки для зміни частоти опитування використовують двійковий подільник, то крок переналаштування частоти вихідного сигналу буде нерівномірним, що є основним недоліком класичного цифрового синтезу.

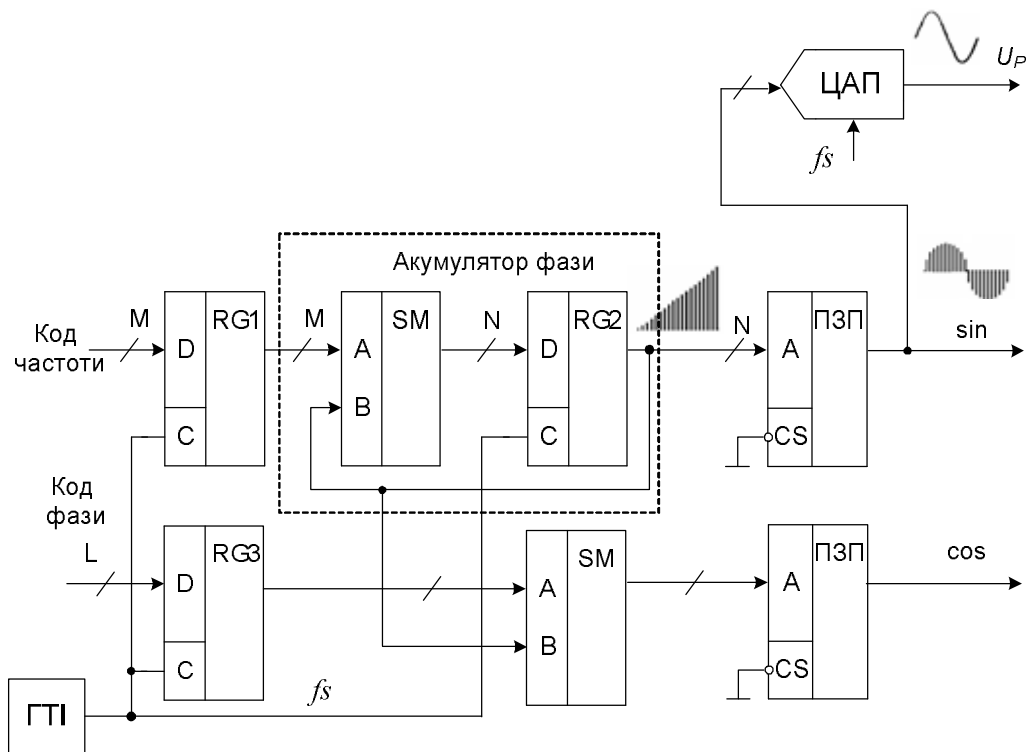


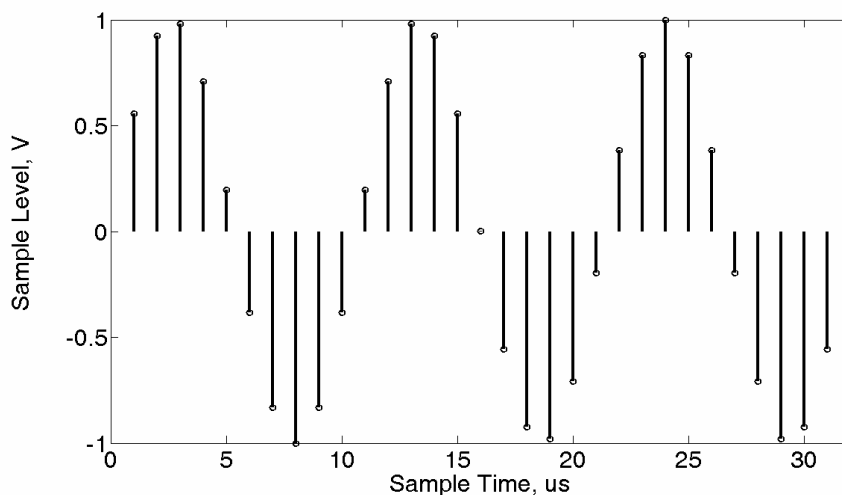
Рис. 2. Функціональна схема синтезатора DDS

Синтезатори DDS (прямі цифрові синтезатори) дають змогу генерувати сигнали в широкому частотному діапазоні (від часток Гц до сотень МГц), забезпечують збереження стабільності

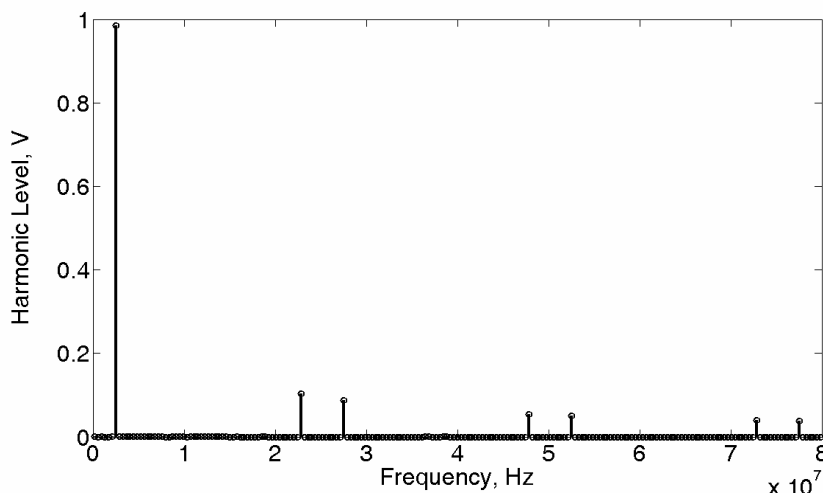
параметрів синтезованого сигналу (форми, амплітуди, частоти, фази), відзначаються притаманною цифровим системам точністю та швидкодією. Наявність надвисокорозрядного акумулятора фази забезпечує високу роздільну здатність переналаштування за частотою. Основною перевагою DDS-синтезаторів порівняно з класичними цифровими синтезаторами є рівномірний крок переналаштування частоти вихідного сигналу. Крім того, такі синтезатори випускаються в інтегральному виконанні та відзначаються низькими вартістю і споживаною потужністю, а цифровий інтерфейс уможлиблює дистанційне управління. Тому доцільно розглянути можливість побудови джерела зондувального сигналу в ЧАІ на засадах прямого цифрового синтезу [1, 2, 3, 4].

Прямий цифровий синтез зондувального сигналу. До складу сучасних синтезаторів DDS (рис. 2) входять: генератор тактових імпульсів (ГТІ), акумулятор фази, перетворювач фази на амплітуду табличного типу (реалізований на ПЗП) і ЦАП.

На кожному такті роботи синтезатора код N на виході регістра $RG2$ лінійно зростає в часі, формуючи миттєві значення фази вихідного сигналу. Крок приросту фази залежить від значення постійного доданка – коду частоти M , записаного в регістр $RG1$. ПЗП перетворює вихідний код акумулятора фази N на відповідні поточні значення синусоїдального сигналу, а ЦАП формує неперервний аналоговий сигнал. Акумулятор фази працює з періодичними переповненнями, які відповідають періоду синусоїдальної функції.



a



б

Рис. 3. Дискретизований сигнал (а) та його спектр (б)

Як впливає зі структурної схеми ЧАІ (рис. 1), DDS-синтезатори, крім аналогового зондувального сигналу U_p , також повинні формувати цифрові опорні ортогональні сигнали (\sin , \cos) для реалізації фазоквадратурного розділення сигналу вимірювальної схеми. Миттєві значення косинусоїди (вихід \cos) отримують зсувом фази сформованого синусоїдного сигналу на 90° . Для цього до коду акумулятора фази N перед перетворенням його на амплітуду додають код фази L , записаний в регістр $RG3$ [2].

Основним недоліком DDS-синтезатора є наявність у спектрі сформованих зондувального U_p та ортогональних \sin і \cos сигналів побічних (паразитних) гармонік, що зумовлює зниження точності ЧАІ. За природою виділяють паразитні гармоніки від дискретизації, від усікання коду акумулятора фази та від квантування.

Дискретизація (подання гармонічного сигналу N вибірок на період) призводить до появи у спектрі синтезованого сигналу, крім основної, низки паразитних гармонік (рис. 3).

Частоти паразитних гармонік від дискретизації визначаються за формулою:

$$f_p = k \cdot f_s / N \pm f_o,$$

де f_s і f_o – відповідно тактова частота і частота основної гармоніки; N – кількість вибірок на період; $k = 1, 2, 3 \dots$

Оскільки розрядність акумулятора фази значно перевищує розрядність ПЗП, то при перетворенні фази на амплітуду молодші розряди відкидаються. Таке усікання коду акумулятора фази спричиняє виникнення додаткових паразитних гармонік (див. рис. 4).

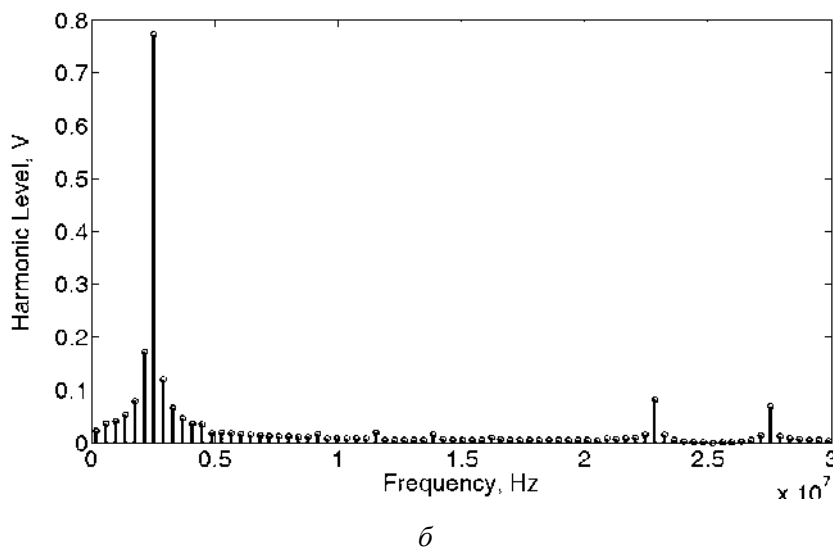
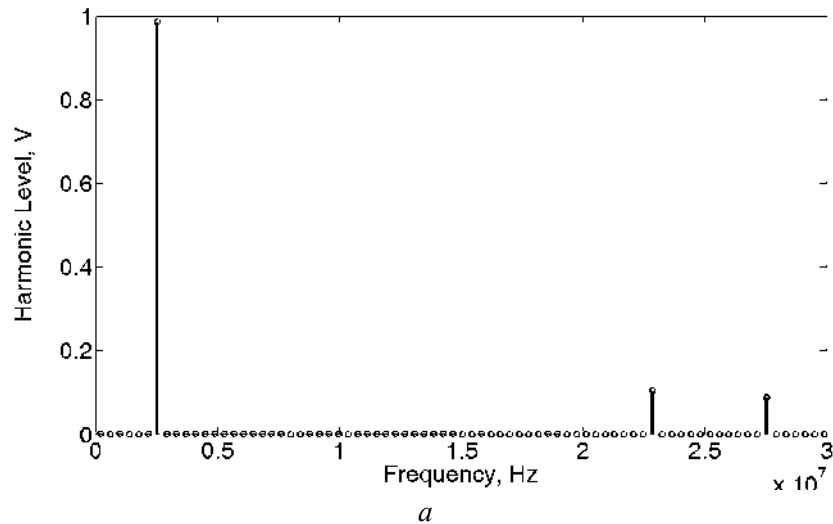


Рис. 4. Паразитні гармоніки в спектрі зондувального сигналу:
а – від дискретизації; б – від усікання коду фази

Паразитні гармоніки від квантування мають квазівипадковий характер, незначну інтенсивність і розподілені вздовж усього спектра сигналу.

Дестабілізуючий вплив паразитних гармонік на вимірювальну схему та канал ЦОС

Наявність паразитних гармонік у спектрі зондувального сигналу є вкрай небажаною передовсім із таких причин:

- досліджувані об'єкти зазвичай описуються багатоелементними схемами заміщення, тобто реагують на полігармонічний сигнал;
- частотозалежна вимірювальна схема спричинятиме зміну інтенсивності гармонічних складових у спектрі сигналу;
- наявність паразитних гармонік в складі опорних ортогональних сигналів \sin і \cos проявлятиметься виникненням похибок на етапі фазоквадратурного перетворення.

Під час вимірювання імпедансу для забезпечення лінійності функції перетворення використовують вимірювальні схеми, що є диференціаторами. Для прикладу розглянемо вимірювальну схему, побудовану за методом автобалансування (рис. 5).

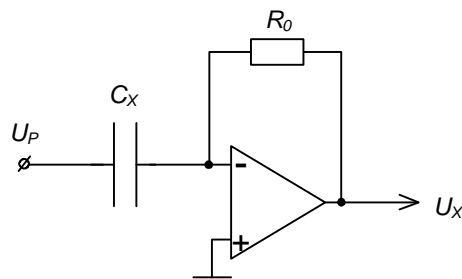


Рис. 5. Вимірювальна схема за методом автобалансування

Функція перетворення цієї ВС у першому наближенні описується таким виразом [5, 6]:

$$U_X(w) = -jwC_X R_O U_P(w) \times \frac{I}{I + \frac{jw}{w_T} (I + jwC_X R_O)},$$

де $U_P(w) = w_0 U_P(w_0) + \sum_k k w_0 U_P(k w_0)$ – полігармонічний зондувальний сигнал.

На частотах $w \ll w_T$ ВС працює як диференціатор, тобто спостерігається підсилення відносно основної рівня вищих гармонік:

$$U_X(w) = -jC_X R_O \left[w_0 U_P(w_0) + \sum_k k w_0 U_P(k w_0) \right].$$

На інтервалі $w \geq w_T$ через інерційність операційного підсилювача ВС набуває характеру інтегратора, що зумовлює послаблення гармонічних складових, вищих за частоту одиничного підсилення.

Основне завдання каналу цифрового опрацювання сигналів (рис. 6) полягає у виділенні активної N_A та реактивної N_P складових імпедансу. Для цього застосовують фазоквадратурне розділення сигналу вимірювальної схеми.

Фазоквадратурному розділенню передують аналого-цифрове перетворення, в ході якого миттєві значення вихідної напруги ВС $U_X(w)$ перетворюються на відповідний код $M_X(i)$. Для цього застосовують швидкодіючий АЦП паралельного типу, тактова частота якого f_S задається безпосередньо генератором тактових імпульсів, що входить до складу DDS-синтезатора.

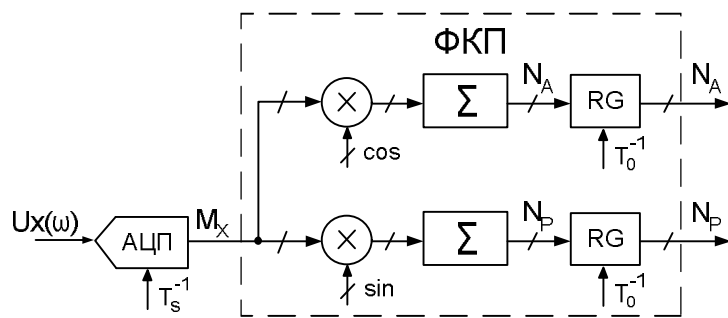


Рис. 6. Структурна схема каналу цифрового опрацювання сигналів

У ЧАІ з цифровим опрацюванням сигналів фазоквадратурне розділення реалізоване за алгоритмом одночастотного дискретного перетворення Фур'є:

$$N_A = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} M_X(i) \cos(i) \quad \text{і} \quad N_P = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} M_X(i) \sin(i).$$

Після оцифрування сигналу вимірювальної схеми відліки $M_X(i)$ перемножуються з опорними цифровими ортогональними сигналами \sin та \cos , сформованими синтезатором DDS. Одержані добутки впродовж інтервалу перетворення T_0 підсумовуються у нагромаджувальних суматорах Σ та у вигляді кодів N_A і N_P , що відповідають результатам вимірювання активної та реактивної складових імпедансу, записуються у регістри пам'яті RG [7].

Алгоритм дискретного перетворення Фур'є зазнаватиме дестабілізуючого впливу паразитних гармонік, оскільки вони містяться як у сигналі вимірювальної схеми, так і в складі опорних ортогональних сигналів. Отже, паразитні гармоніки вносять додаткову похибку у результат вимірювання.

У разі некратності періоду зондувального сигналу та інтервалу перетворення спостерігається перетікання спектра, що спричиняє появу нових побічних гармонік (рис. 7) і зумовлює істотне погіршення точності ЧАІ.

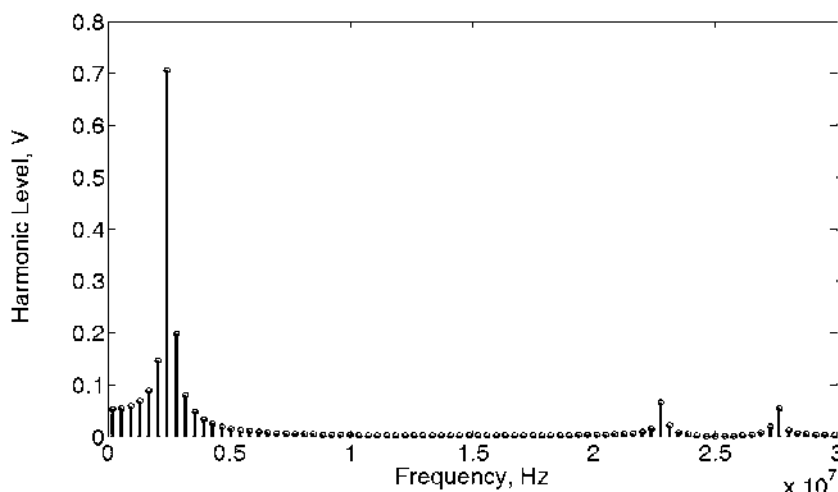


Рис. 7. Ефект перетікання спектра

Застосування прямого цифрового синтезу в частотних аналізаторах імпедансу пов'язане із вирішенням таких проблем:

- забезпечення достатньої щодо точності ЧАІ спектральної чистоти зондувального сигналу;
- зменшення або усунення ефекту перетікання спектра.

Один із варіантів забезпечення задовільного спектрального складу зондувального сигналу передбачає послаблення паразитних гармонік з використанням фільтрів. Проте застосування цього підходу в ЧАІ є проблематичним через необхідність переналаштування частоти фільтрації, а також через неконтрольовані фазові зсуви. Тому перспективнішим видається здійснювати добір параметрів DDS-синтезатора, за яких рівнем паразитних гармонік можна нехтувати.

Традиційно для зменшення ефекту перетікання спектра в техніці цифрового оброблення сигналів застосовують віконне згладжування. Однак такий метод може дати незадовільні з метрологічного погляду результати. Тому найкращим вирішенням цієї проблеми є уникнення умов, що спричиняють перетікання спектра. Цього можна було б досягти переналаштуванням тактової частоти DDS-синтезатора, що вимагає окремих досліджень.

Висновки. Під час побудови ЧАІ важливим завданням є вибір джерела зондувального сигналу. Для цього доцільно використати DDS-синтезатори, які забезпечують синтез зондувальних сигналів в широкому частотному діапазоні за збереження стабільності їх параметрів та швидке переналаштування по частоті з високою роздільною здатністю. Крім того, DDS-синтезатори застосовують для формування опорних ортогональних сигналів для фазоквадратурного розділення.

Основним недоліком DDS-синтезатора є наявність у спектрі синтезованих сигналів паразитних гармонік, що спричиняє погіршення точності ЧАІ. Дестабілізуючий вплив цих гармонік проявляється як у вимірювальній схемі, так і в каналі цифрового оброблення сигналів.

Для успішного використання синтезаторів DDS необхідно передовсім вирішити такі проблеми:

- зменшити дестабілізуючий вплив паразитних гармонік на вимірювальну схему і канал ЦОС за допомогою добору параметрів синтезатора;
- усунути ефект перетікання спектра переналаштуванням тактової частоти.

1. Ридико Л. *DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии.* 2001. – № 7. – С. 50–54. http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_07/stat_50.htm. 2. Макаренко В. *Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза // Электронные компоненты и системы.* – 2004. – № 1. – С. 3–7. 3. Кушинг Р. *Прямой цифровой синтез (DDS) и преобразование квадратурных сигналов в диапазон 800-2500 МГц с одной боковой полосой (SSB).* <http://analog.com.ru/Public/DDS.pdf>. 4. Eva Murphy, Colm Slattery *Direct Digital Synthesis (DDS) Controls Waveform in Test, Measurement, and Communications.* http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf. 5. Соклоф С. *Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1988. – 583 с. 6. Достал И. *Операционные усилители: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1982. – 512 с. 7. Еришов М. *Реализация измерителя импеданса на основе дискретного преобразования Фурье // Схемотехника.* – 2007. – № 3. – С. 6–10.