

**АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ
У ПРЯМИХ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТИ (DDS)**

У даній роботі проаналізовано параметри прямих цифрових синтезаторів частоти (DDS). Побудована узагальнена модель тестового блоку для аналізу ШПФ сигналу з виходу DDS синтезатора. Розраховано наступні параметри: сигнал-шум-спотворення (SINAD); співвідношення сигнал-шум (SNR); ефективна кількість бітів (ENOB). Наведено математичні співвідношення між цими параметрами.

Ключові слова: SINAD, ENOB, SNR, THD, DDS, ШПФ, прямий синтезатор частоти (DDS), direct digital synthesizer.

V. MELNYCHUK, O. POLIKAROVSKYKH
Khmelnitsky National University

**ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERSION
IN DIRECT DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZERS (DDS)**

In this paper, the basic parameters of direct digital frequency synthesizers (DDS) are analyzed. A generalized model of the test block for the analysis of the FFT signal from the output of the DDS synthesizer was constructed. The following parameters are calculated: signal-noise-distortion (SINAD); signal-to-noise ratio (SNR); effective number of bits (ENOB). The mathematical relations between these parameters are given. Six popular specifications for quantifying ADC dynamic performance are SINAD (signal-to-noise-and-distortion ratio), ENOB (effective number of bits), SNR (signal-to-noise ratio), THD (total harmonic distortion), THD + N (total harmonic distortion plus noise), and SFDR (spurious free dynamic range). Although most DDS manufacturers have adopted the same definitions for these specifications, some exceptions still exist. Because of their importance in comparing DDSs, it is important not only to understand exactly what is being specified, but the relationships between the specifications. The article analyzes the parameters of digital-analogue conversion in direct frequency synthesizers (DDS). The mathematical relations between SINAD, SNR and THD are obtained. The results of synthesized signal analysis using these parameters are presented. The signal-to-noise ratio (SNR, or sometimes called the SNR without harmonics) is calculated from FFT data in the same way as SINAD, except that the harmonics of the signal are eliminated from the calculation, leaving only the noise ratio. It has been established that only the first 5 harmonics should be excluded, since they dominate, and the following do not have a significant effect. Since SINAD, SNR, ENOB, THD, THD + N, and SFDR are common indicators of dynamic DDS performance, the main task of the study is to establish relationships between these parameters in the context of the manufacturer's specification. The SINAD graph shows that the characteristics of the synthesized signals deteriorate due to high-frequency distortion and are usually constructed for frequencies that are significantly higher than the Nyquist frequency, so we can determine the power of additional components without sampling. Also in work the structural scheme of the test set for analysis of the FFT signal from the output of DDS is analyzed. Using the ADIsimDDS program of the Analog Devices for DDS synthesizers, a typical FFT output for DDS AD9851 with an input clock rate of 95 MHz was investigated.

Keywords: SINAD, ENOB, SNR, THD, DDS, ШПФ, direct digital synthesizer (DDS), direct digital synthesizer

Постановка задачі

До важливих параметрів для кількісної оцінки динамічної продуктивності DDS відносять: SINAD (Signal-to-Noise And Distortion ratio) – це співвідношення сигнал/шум плюс спотворення або відношення суми сигналу, шуму і спотворень до сумарного рівня шуму і спотворень; ENOB (Effective Number Of Bits) – це ефективна кількість двійкових розрядів або ефективна кількість біт; SNR (Signal-to-Noise Ratio) – це співвідношення сигнал/шум, THD (Total Harmonic Distortion) – коефіцієнт нелінійних спотворень; THD + N (Total Harmonic Distortion plus Noise) – це коефіцієнт нелінійних спотворень плюс шум; SFDR (Spurious-Free Dynamic Range) – динамічний діапазон вільний від паразитних складових. Хоча більшість виробників DDS прийняли однакові визначення для цих параметрів, деякі винятки все ще існують. Через їх важливість при порівнянні DDS важливо не тільки точно зрозуміти, що конкретний параметр означає, але і правильно розраховувати співвідношення між цими параметрами.

Виклад основного матеріалу

Існує кілька способів кількісної оцінки спотворень та шумів у DDS синтезаторах. Всі вони засновані на аналізі ШПФ (Швидке Перетворення Фур'є) з використанням узагальненої тестової установки, яку показано на рис. 1 [1].

Спектральний вихід ШПФ є серією точок $M/2$ в частотній області (M – це розмір ШПФ, іншими словами кількість вибірок, збережених в буферній пам'яті). Інтервал між точками дорівнює f_s/M , а загальний діапазон частот – від постійного струму до $f_s/2$, де f_s – частота дискретизації. Ширина кожної частоти комірки в бітах (іноді називається роздільністю ШПФ) дорівнює f_s/M . На рисунку 2 показаний вихід ШПФ для ідеального DDS. Потрібно звернути увагу на те, що теоретично рівень шуму ШПФ дорівнює SNR плюс коефіцієнт посилення ШПФ, $10 \times \log(M/2)$. Важливо пам'ятати, що значення шуму, що використовується в обчисленні SNR, являє собою шум, який поширюється на усю ширину смуги Найквіста (від постійного струму до $f_s/2$), але ШПФ діє як вузькосмуговий аналізатор спектру з пропускнуою здатністю f_s/M , що рухається по спектру. Це призводить до зменшення шуму на величину,

рівну коефіцієнту підсилення процесу, такого ж ефекту, як і звуження смуги пропускання аналогового аналізатора спектра.

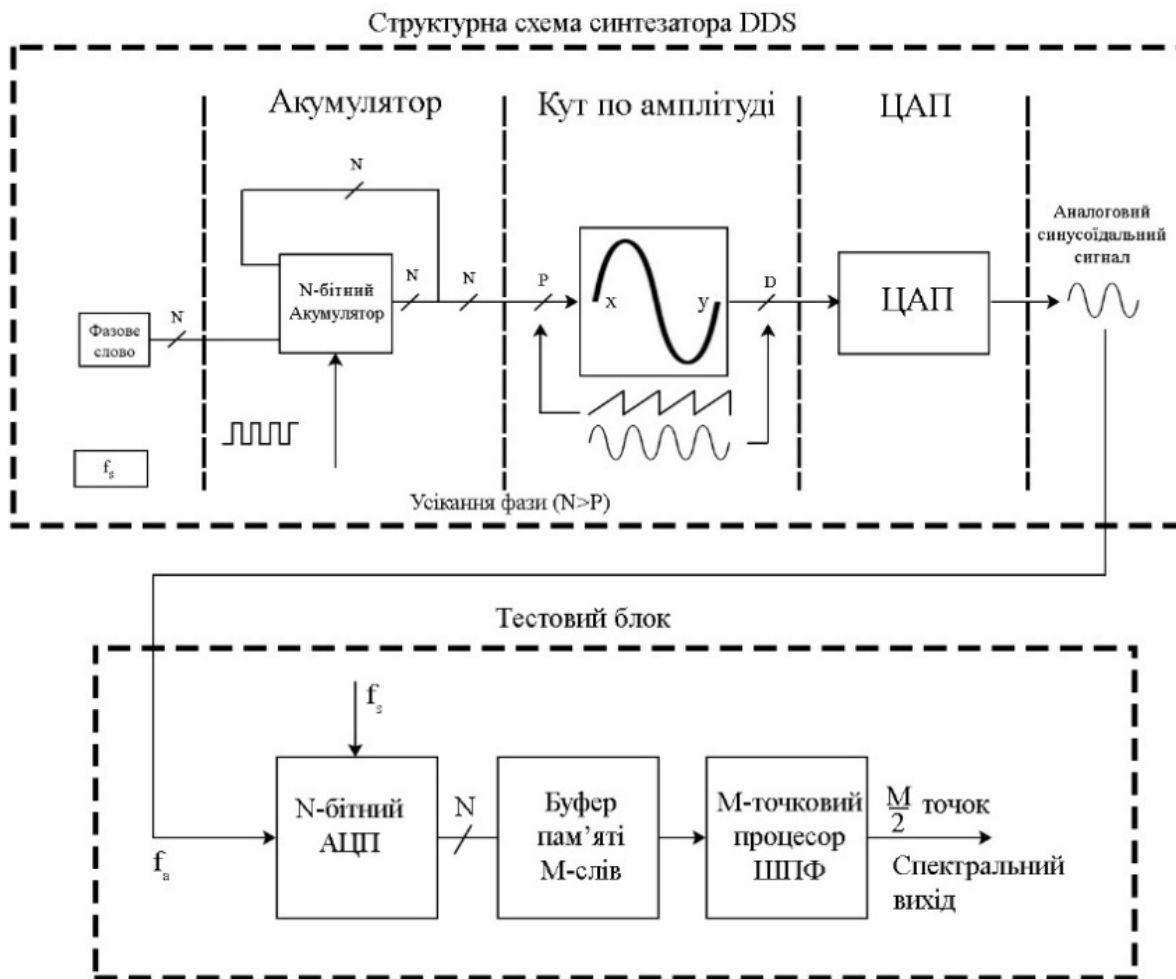


Рис. 1. Узагальнена структурна схема тестової установки для аналізу ШПФ сигналу з виходу DDS

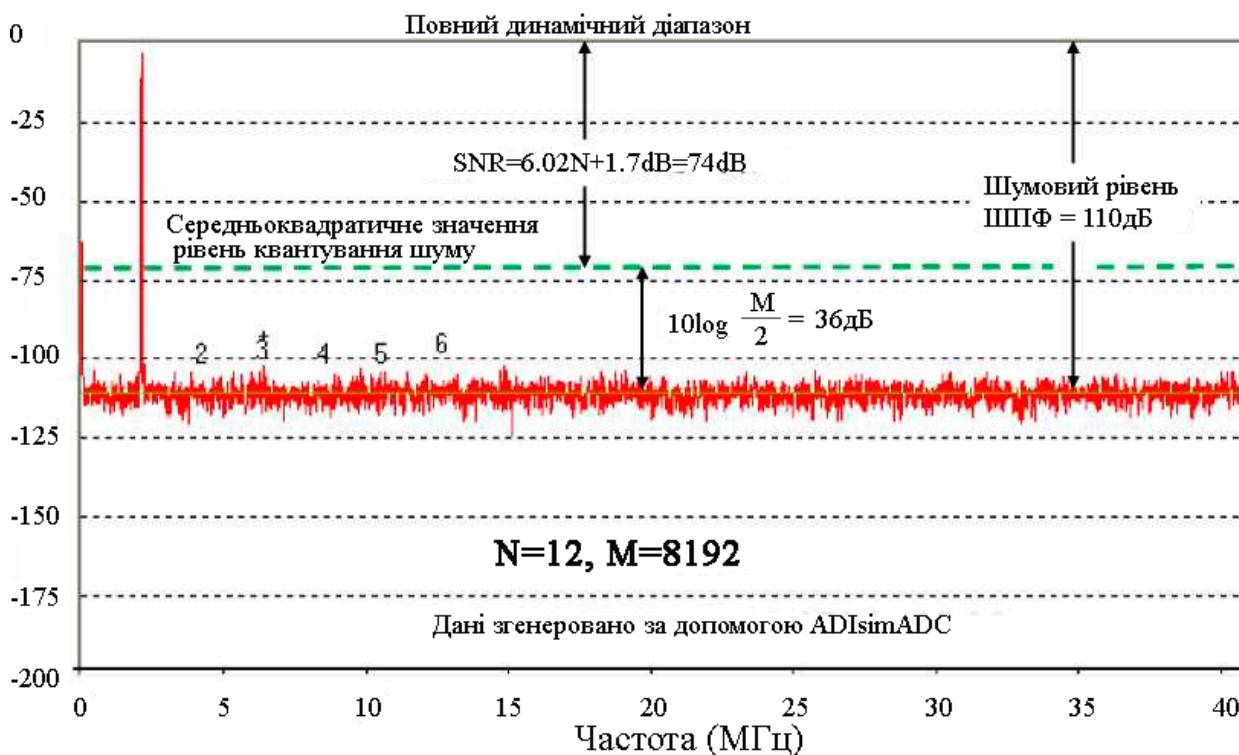


Рис. 2. ШПФ з виходу ідеального DDS, вхід = 2.111 МГц, $f_s = 82$ Мвіб/с, усереднено 5 ШПФ, $M = 8192$

Дані ШПФ, показані на рисунку 2, являють собою середнє значення по 5 окремих ШПФ. Потрібно звернути увагу, що усереднення числа ШПФ не впливає на середній рівень шуму, воно лише потрібно для того, щоб «згладити» випадкові складові, що містяться в кожній частотній комірці.

Вихід ШПФ можна використовувати як аналоговий аналізатор спектру для вимірювання амплітуди різних гармонік і складових шуму оцифрованого сигналу. Гармоніки вхідного сигналу можна відрізнити від інших типів спотворень по їх розташуванню в частотному спектрі. На рисунку 3 показаний синтезований сигнал DDS 7 МГц, тактований від 20 Мвиб/с, і розташування перших 9 гармонік. Накладені гармоніки f_a з'являються на частотах, рівних $|\pm Kf_s \pm nf_a|$, де n – порядок гармоніки, а $K = 0, 1, 2, 3, \dots$. Друга і третя гармоніки, як правило, єдині зазначені в технічній документації, оскільки вони, як правило, є найбільшими, хоча в деяких технічних даних може вказуватися значення лише найгіршої гармоніки.

Гармонійне спотворення зазвичай вказується в дБ (децибели нижче несучої), хоча у деяких випадках його вказують у відсотках. Це є відношення середньоквадратичного сигналу до середньоквадратичного значення даної гармоніки. Гармонійні спотворення зазвичай вказуються з вхідним сигналом близько повної шкали (зазвичай від 0,5 до 1 дБ нижче повної шкали для запобігання відсікання), але його можна вказати на будь-якому рівні. Для сигналів, значно менших, ніж повний динамічний діапазон, спотворення відбуваються шляхом диференціальної нелінійності ЦАП перетворювача, а не гармоніки опорної частоти, можуть обмежувати якісні параметри синтезованих сигналів [2].

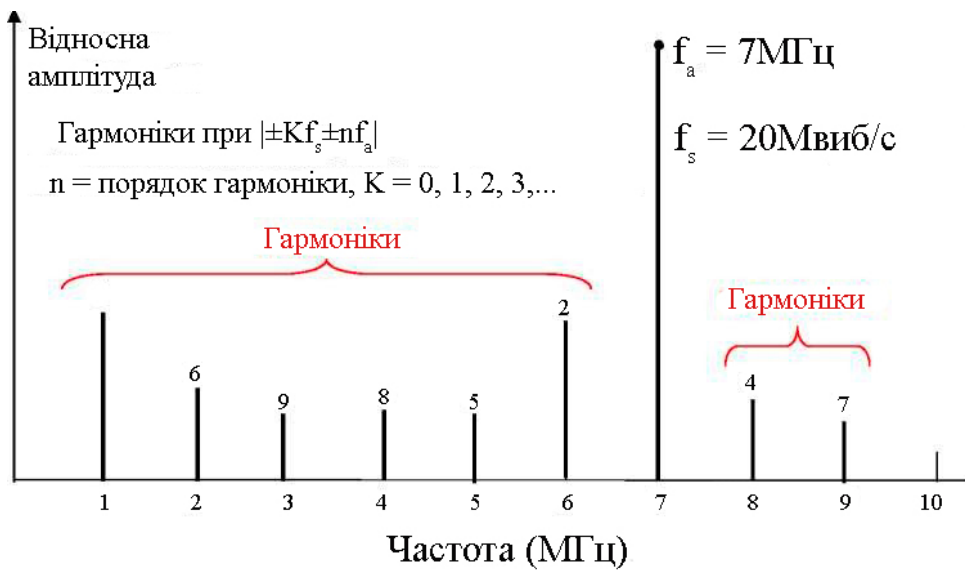


Рис. 3. Розташування продуктів спотворення: вхідний сигнал = 7 МГц, частота дискретизації = 20 Мвиб/с

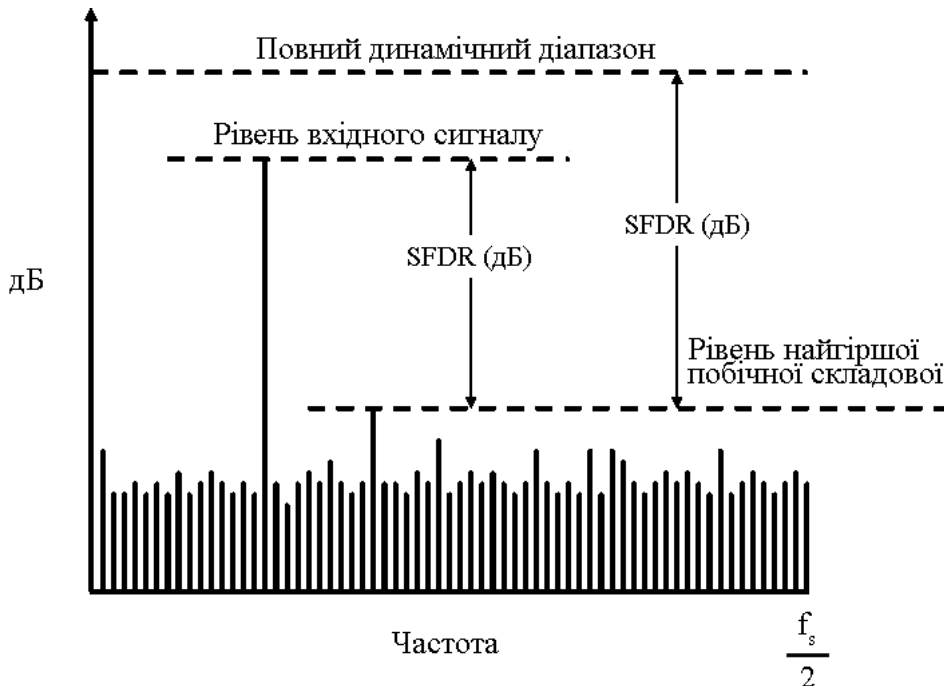


Рис. 4. Динамічний діапазон вільний від паразитних складових (SFDR)

Повне гармонійне спотворення (THD) – це відношення середньоквадратичного значення основного сигналу до середнього значення квадрата кореню суми його гармонік (як правило, істотні тільки перші 5 гармонік). THD в синтезаторах DDS також зазвичай вказується з вхідним сигналом, близьким до повного динамічного діапазону, хоча його можна вказати на будь-якому рівні.

Коефіцієнт нелінійних спотворень плюс шум (THD + N) – це відношення середньоквадратичного значення основного сигналу до середнього значення квадрата кореню суми його гармонік плюс всі складові шуму (виключаючи постійний струм). Тому необхідно вказати смугу пропускання, по якій вимірюється шум. У ШПФ смуга пропускання дорівнює постійний струм до $f_s / 2$. Якщо смуга пропускання вимірювання дорівнює постійний струм до $f_s / 2$ (ширина смуги Найквіста), то $THD+N$ дорівнюватиме SINAD.

Динамічний діапазон вільний від паразитних складових (SFDR) являє собою відношення середньоквадратичного значення сигналу до середньоквадратичного значення найгіршого паразитного сигналу незалежно від того, де він з'являється у частотному спектрі. Рівень найгіршої побічної складової зазвичай є гармонійним вихідним сигналом. SFDR є важливим параметром в системах зв'язку, оскільки він відображає найменше значення сигналу, яке можна відрізнити від паразитного сигналу, який потрібно вилучити для покращення якості сигналу. SFDR може бути заданий відносно повного динамічного діапазону (дБ ПДД) або по відношенню до фактичної амплітуди сигналу (дБ ФАС). Графічно параметр SFDR показано на рис. 4 [3].

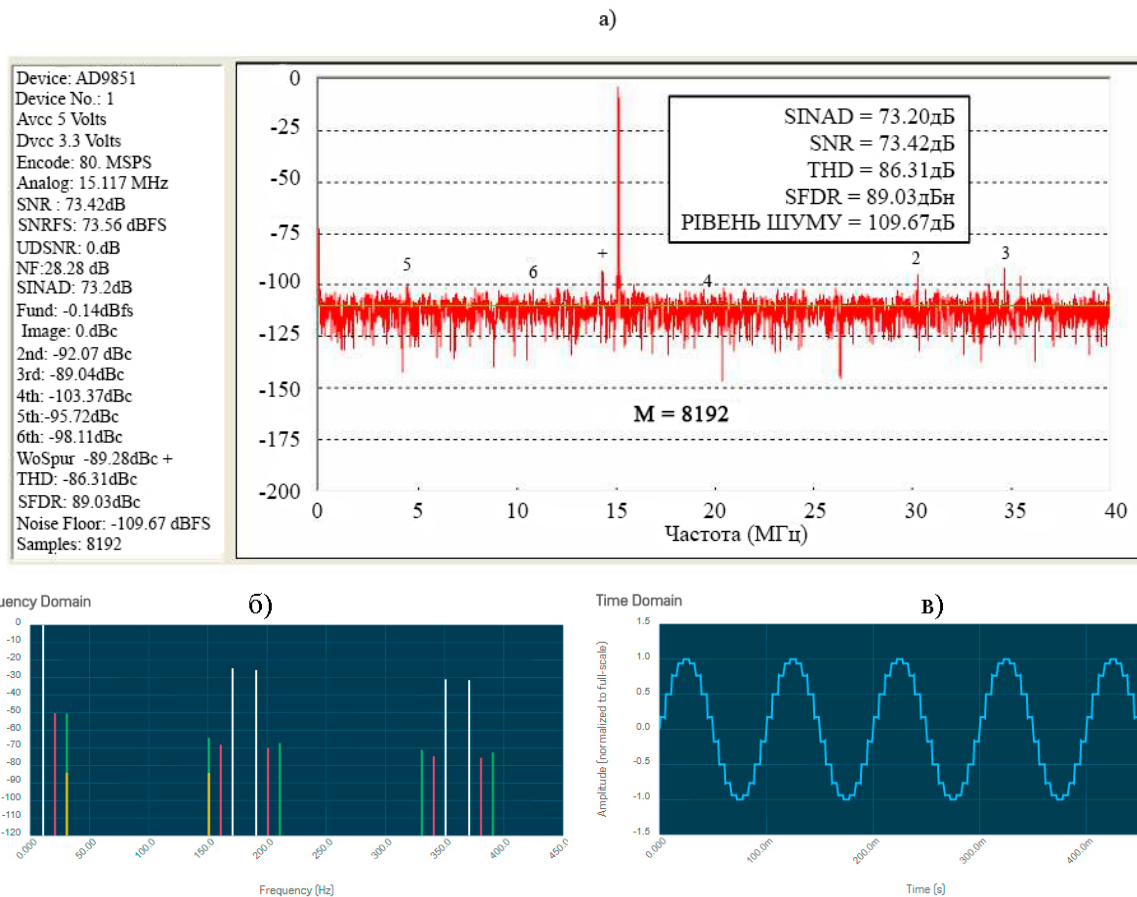


Рис. 5. AD9851 14-біт, 80Мвб/с DDS $f_{in} = 180\text{MHz}$, $f_{out} = 10\text{MHz}$, дані отримані за допомогою ADIsimDDS

Програма ADIsimDDS для синтезаторів DDS дозволяє оцінювати різні високопродуктивні DDS на робочих частотах, а також частотах дискретизації. Моделі ADIsimDDS дають точне уявлення фактичної продуктивності, а типовий вихідний сигнал ШПФ для DDS AD9851 показаний на рисунку 5,б, вхідна частота становить 95 МГц, а згладжена 15 МГц за допомогою обробки вибірки. На виході також відображаються розташування другої та третьої гармонік. В цьому випадку ці гармоніки є комбінаційними складовими. Програма також обчислює і табулює важливі паразитні складові, які показано на відповідному графіку, рис. 5,а.

Розрахунок параметрів сигнал–шум–спотворення (SINAD), співвідношення сигнал–шум (SNR) і ефективна кількість бітів (ENOB)

SINAD і SNR заслуговують особливої уваги, тому що між виробниками DDS все ще є деякі відмінності щодо їх точного визначення. Співвідношення сигнал–шум–спотворення (SINAD або

$S / (N + D)$ – це відношення середньоквадратичної амплітуди сигналу до квадратного кореню із суми квадратів (RSS) всіх інших компонентів синтезу, включаючи гармоніки, але без врахування постійного струму. SINAD є хорошим показником загальної динамічної продуктивності DDS, оскільки він включає в себе всі складові, які створюють шум та побічні складові. SINAD часто відображається для різних вхідних амплітуд і частот. Для заданої вхідної частоти та амплітуди SINAD дорівнюватиме $THD+N$, за умови, що ширина полоси для вимірювання шуму однакова для обох (ширина смуги Найквіста). Типовий графік SINAD для DDS AD9851, показано на рисунку 6.

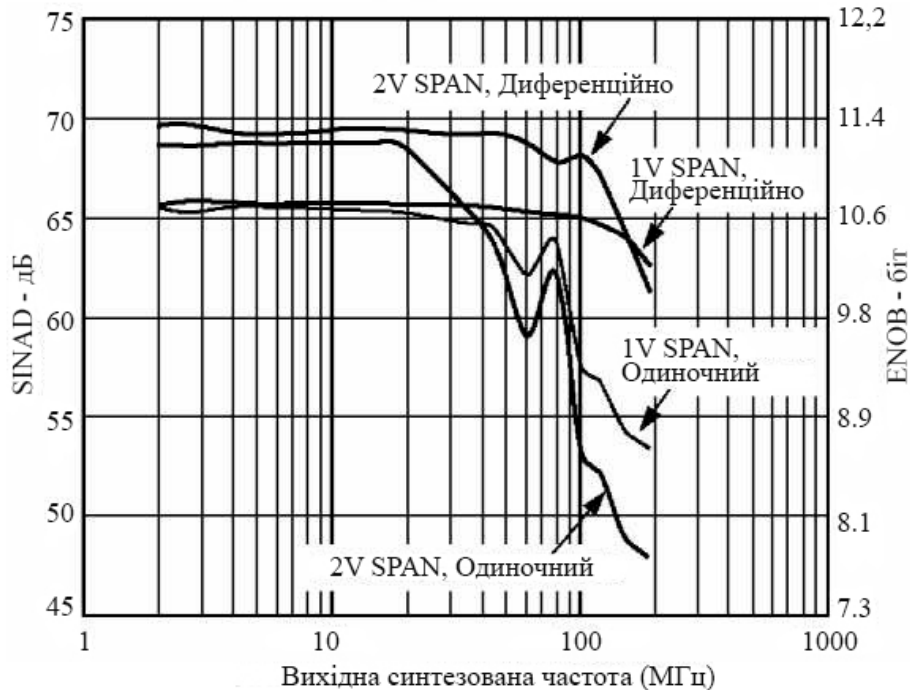


Рис. 6. SINAD і ENOB для різних вхідних повномасштабних діапазонів в AD9851 DDS

Графік SINAD показує, що характеристики синтезованих сигналів погіршуються через високочастотні спотворення і зазвичай будуються для частот, які значно перевищують частоту Найквіста, тому ми можемо визначити потужність додаткових складових без дискретизації. Такі графіки SINAD дуже корисні під час оцінки динамічних характеристик DDS. SINAD часто перетворюється в параметр ENOB, використовуючи співвідношення для теоретичного SNR ідеального N-розрядного DDS: $SNR = 6,02N + 1,76 \text{ dB}$. Рівняння вирішується для N, а значення SINAD замінюється на SNR:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76dB}{6.02} \tag{1}$$

Потрібно звернути увагу, що у рівнянні 1 ми приймаємо повномасштабний вхідний сигнал. Якщо рівень сигналу знижується, значення SINAD та ENOB зменшуються. Тому необхідно додати поправочний коефіцієнт для обчислення ENOB при зменшених амплітудах сигналів, як показано в рівнянні 2

$$ENOB = \frac{SINAD_{вим} - 1.76dB + 20 \log \left(\frac{A_n}{A_6} \right)}{6,02} \tag{2}$$

Поправочний коефіцієнт істотно «нормалізує» значення ENOB незалежно від фактичної амплітуди сигналу.

Відношення сигнал/шум (SNR, або іноді називають SNR без гармонік) розраховується за даними ШПФ так само, як SINAD, за винятком того, що гармоніки сигналу виключаються з розрахунку, залишаючи тільки співвідношення шумів. На практиці необхідно виключити тільки перші 5 гармонік, оскільки вони домінують, а наступні вже не мають істотного впливу. Графік SNR буде погіршуватись на високих вхідних частотах, але зазвичай не так швидко, як SINAD через виключення гармонійних елементів.

Кілька специфікацій DDS посилаються на SINAD маючи на увазі SNR, тому потрібно бути уважним та обережним під час інтерпретації цих специфікацій і точно розуміти, що позначає виробник.

Математичне співвідношення між SINAD, SNR, та THD

Проаналізуємо математичні співвідношення між SINAD, SNR і THD (припускаючи, що всі вимірюються з однаковою амплітудою та частотою вхідного сигналу). У наступних рівняннях SNR, THD та

SINAD виражаються в дБ, і виводяться з фактичних числових співвідношень S/N , S/D , $S/(N+D)$, як показано нижче:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{S}{N} \right), \quad (3)$$

$$THD = 20 \log \left(\frac{S}{D} \right), \quad (4)$$

$$SINAD = 20 \log \left(\frac{S}{N+D} \right). \quad (5)$$

Формули 3,4 та 5 можуть бути перетворені для чисельних співвідношень N/S , D/S та $(N+D)/S$ таким чином:

$$\frac{N}{S} = 10^{-SNR/20}, \quad (6)$$

$$\frac{D}{S} = 10^{-THD/20}, \quad (7)$$

$$\frac{N+D}{S} = 10^{-SINAD/20}. \quad (8)$$

Оскільки знаменники рівнянь 6, 7 та 8 всі рівні S , то корінь квадратний N/S і D/S дорівнює $(N+D)/S$ наступним чином:

$$\frac{N+D}{S} = \left[\left(\frac{N}{S} \right)^2 + \left(\frac{D}{S} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(10^{-SNR/20} \right)^2 + \left(10^{-THD/20} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\frac{N+D}{S} = \left[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Тому $S/(N+D)$ має бути рівним:

$$\frac{S}{N+D} = \left[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10} \right]^{-1/2}, \quad (11)$$

а отже,

$$SINAD = 20 \log \left(\frac{S}{N+D} \right) = -10 \log \left[10^{-SNR/10} + 10^{-THD/10} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

За допомогою рівняння 12 ми отримуємо параметр SINAD у вигляді співвідношення SNR і THD.

Аналогічно, якщо ми знаємо SINAD і THD, ми можемо отримати значення SNR наступним чином:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{S}{N} \right) = -10 \log \left[10^{-SINAD/10} - 10^{-THD/10} \right]. \quad (13)$$

Аналогічно, якщо ми знаємо SINAD і SNR, ми можемо знайти значення THD наступним чином:

$$THD = 20 \log \left(\frac{S}{D} \right) = -10 \log \left[10^{-SINAD/10} - 10^{-SNR/10} \right]. \quad (14)$$

Важливо ще раз підкреслити, що ці відносини зберігаються, тільки якщо вхідна частота і амплітуда рівні для всіх трьох вимірів.

Висновки

У статті проаналізовано параметри цифро-аналогового перетворення у прямих синтезаторах частоти (DDS). Отримано математичні співвідношення між SINAD, SNR і THD. Наведено результати аналізу синтезованого сигналу за допомогою цих параметрів. Відношення сигнал/шум (SNR, або іноді називають SNR без гармонік) розраховується за даними ШПФ так само, як SINAD, за винятком того, що гармоніки сигналу виключаються з розрахунку, залишаючи тільки співвідношення шумів. Встановлено, що необхідно виключити тільки перші 5 гармонік, оскільки вони домінують, а наступні не мають істотного впливу.

Оскільки SINAD, SNR, ENOB, THD, THD + N і SFDR є загальними показниками динамічної продуктивності DDS, головним завданням дослідження є встановлення залежностей між цими параметрами в контексті специфікації виробника. Графік SINAD показує, що характеристики синтезованих сигналів погіршуються через високочастотні спотворення і зазвичай будуються для частот, які значно перевищують частоту Найквіста, тому ми можемо визначити потужність додаткових складових без дискретизації.

Також у роботі проаналізовано структурну схему тестової установки для аналізу ШПФ сигналу з

виходу DDS. За допомогою програми ADIsimDDS фірми Analog Devices для синтезаторів DDS досліджено типовий вихідний сигнал ШПФ для DDS AD9851 з вхідною тактовою частотою – 95 МГц.

Література

1. Kester W., „Chapter 2: Fundamentals of Sampled Data Systems“, The Data Conversion Handbook, Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0–7506–7841–0, pp. 3–53.
2. Макаренко В. Фазо-цифровые и частотно-цифровые синтезаторы частоты. Часть 1 / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2012. – № 1. – С. 24–30.
3. Hank Zumbahlen, Chapter 6: Converters, Linear Circuit Design Handbook, Elsevier–Newnes, 2008, ISBN–10: 0750687037, ISBN–13: 978–0750687034, pp. 133–180.
4. Макаренко В. Компоненты для построения беспроводных устройств связи. Часть 7. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 1. – С. 34–46.
5. Полікаровських О.І. Архітектура прямого цифрового синтезатора частоти для рішень цифрового радіо / О.І. Полікаровських // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – Том 3. – С. 142–146.

References

1. W. Kester, „Chapter 2: Fundamentals of Sampled Data Systems“, The Data Conversion Handbook, Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0–7506–7841–0, pp. 3–53.
2. Makarenko V. Fazo–tsifrovyye i chastotno–tsifrovyye sintezatoryi chastoty. Chast 1 / V. Makarenko // Elektronnyie komponentyi i sistemyi. – 2012. – 1. – S. 24–30.
3. Hank Zumbahlen, „Chapter 6: Converters“, Linear Circuit Design Handbook, Elsevier–Newnes, 2008, ISBN–10: 0750687037, ISBN–13: 978–0750687034, pp. 133–180.
4. Makarenko V. Komponentyi dlya postroeniya besprovodnyih ustroystv svyati. Chast 7. Sintezatoryi chastoty pryamogo tsifrovogo sinteza / V. Makarenko // Elektronnyie komponentyi i sistemyi. – 2010. – 1. – S. 34–46.
5. Polikarovskiy O.I Arhitektura pryamogo tsifrovogo sintezatora chastoty dlya rishen tsifrovogo radlo / O.I. Polikarovskiy // Herald of Khmelnytskyi National University.– 2012. – Tom 3. – S. 142–146.

Рецензія/Peer review : 17.11.2017 р.

Надрукована/Printed :12.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.