

каналах.

За допомогою виразу (14) можна оцінити характер зміни граничного придушення від величини  $t$ . Використовуючи огинаючу виду

$$k(t) = e^{-at^2},$$

бачимо, що із зростанням  $t$  збільшується коефіцієнт граничного придушення.

### Висновки

В результаті проведеного аналізу методу компенсації завад для випадку симетричного розташування елементів еквідистантної антенної решітки з використанням у якості критерію коефіцієнта граничного придушення отримані аналітичні вирази для значень вагових коефіцієнтів. Ці вирази дають можливість використання властивостей симетрії при побудові кіл керування в адаптивних антенних пристроях амплітудно-фазової компенсації завад. По отриманому аналітичному виразу для коефіцієнта граничного придушення визначена залежність коефіцієнта граничного придушення від величини затримки в елементах антенної решітки. Встановлена можливість побудови фазової адаптивної системи з використанням властивостей симетрії вагових коефіцієнтів.

### Література

1. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Уидроу Б., Стирнз С.. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
2. Пистолькорс А.А. Введение в теорию адаптивных антенн./ Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
3. Монзинго Р.А Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию/ Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 486 с.
4. Kolyadenko Yu.Yu. Adaptive antenna arrays in the auxiliary receiving channel of the interference compensator for user radioaccess systems / Kolyadenko Yu.Yu // IV<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory And Techniques/ 9-12 September 2003/ Sevastopol, Ukraine, – pp. 421-423;
5. Коляденко ЮЮ. Оценка пространственного спектра сигналов с адаптивной пространственно-временной обработкой/ Коляденко ЮЮ // Вісник Українського будинку економічних та науково-технічних знань. Вып. 2. – 2003 г. – С.128- 132.
6. Кичак В.М. Анализ методов адаптивной обработки сигналов в антенных решетках / Кичак В.М., Кравцов И.Ю // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 1. – С.132-136.

Надійшла до редакції  
5.6.2010 р.

УДК 629.783

**С.К. ПІДЧЕНКО, С.В. МАРКОВ, О.А. ЛАБА, А.А. АКУЛІНЧІВ**

Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОКОМПЕНСОВАНОГО DDS В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАБ

Розглянуто принципи побудови цифрових синтезаторів частоти прямого синтезу (DDS) з температурною компенсацією нестабільності частоти джерела опорних коливань. Проведені результати математичного моделювання DDS в системі Matlab/Simulink.

The principle of Direct Digital Synthesis (DDS) frequency synthesizer is considered with the temperature compensation of reference waves' frequency instability. Results of DDS mathematical simulation are produced in the Matlab / Simulink system.

Ключові слова: цифровий синтезатор прямого синтезу, двочастотий генератор, термокомпенсація.

### Вступ

До недавнього часу цифрові синтезатори частоти прямого синтезу (Direct Digital Synthesizers або DDS) мали достатньо обмежену область застосування. Проте, з розвитком інтегральної цифрової техніки, як з технічної, так і з економічної сторони цифровий синтезатор частоти прямого синтезу задовольняє більшості критеріїв ідеального синтезатора частоти: простий, високо інтегрований, з малими масою та габаритами. Серед переваг прямого синтезу частоти слід виділити наступні:

- широкий діапазон частот та екстремально швидкий перехід на іншу частоту без розриву фази;
- малий крок зміни частоти (менше 0,1 Гц), що зменшує вимоги до точності встановлення частоти опорного джерела;
- цифровий інтерфейс, який дозволяє дуже легко здійснювати мікроконтролерне керування.

Однак для забезпечення близьких до потенційних точностних характеристик DDS необхідно високостабільне джерело опорного сигналу, що часто протерічить вимогам щодо масогабаритних

### 1. Структура термокомпенсованого DDS

Для покращення точностних характеристик синтезатора частоти DDS запропоновано використання двочастотного кварцового генератора (КГ) з поточною ідентифікацією теплового стану кварцового резонатора (КР) [2], який збуджується на двох частотах  $f_1$  та  $f_3$  першої та третьої механічних гармонік КР (рис. 1). Сигнал з частотою  $f_1$  подається на перший вхід змішувача (ЗМ), на другий вхід якого сигнал з частотою  $f_3$ , поділену на три за допомогою подільника частоти. На виході змішувача виділяється сигнал різницевої частоти  $f_p$ , яка через подільник частоти з коефіцієнтом  $N_T$  подається на лічильник періоду. Даний сигнал використовується для компенсації температурних відхилень частоти джерела опорного колювання DDS, при цьому коефіцієнт  $N_T$  визначає період та роздільну здатність циклу компенсації. На виході лічильника періоду отримується цифровий код, який має практично лінійну функціональну залежність від температури КР. Він використовується під час формування в мікропроцесорі (МП) коректуючого слова для синтезатора частоти (DDS), за допомогою якого програмною зміною частоти DDS компенсується температурна нестабільність частоти опорного кварцового генератора [3,4].

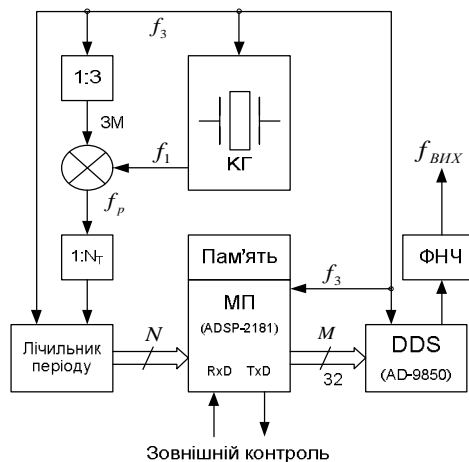


Рис. 1. Структура термокомпенсованого DDS

### 2. Математична модель термокомпенсованого DDS

У відповідності до принципу побудови термокомпенсованого DDS до лічильника періоду надходять імпульси з частотою  $f_3$ , фіксація яких відбувається протягом періоду  $T_p = N_T / f_p$ . Тоді кількість імпульсів яку підраховує лічильник періоду можна представити як

$$N(T) = \frac{f_3(T)}{f_p(T)} \cdot N_T = \frac{f_3(T)}{f_1(T) - \frac{f_3(T)}{3}} \cdot N_T, \quad (1)$$

де  $f_1(T)$  та  $f_3(T)$  - перша та третя механічні гармоніки двочастотного кварцового генератора;  
 $N_T$  - коефіцієнт перерахунку подільника частоти;  
 $T$  - температура.

При цьому керуюче слово  $M$  для компенсації температурних зсувів частоти формується у відповідності до вихідної частоти DDS:

$$M(f_{вих}, N) = \frac{f_{вих} \cdot 2^{32}}{f_3(N)}, \quad (2)$$

де  $f_{вих}$  - вихідна частота DDS.

### 3. Комп'ютерне моделювання в системі Matlab/Simulink

Для дослідження характеристик термокомпенсованого DDS в середовищі Matlab/Simulink розроблена модель, яка включає в себе синтезатор частоти на базі AD9851 і систему компенсації відхилення частоти опорного колювання (рис. 2).

За допомогою блоків **Constant** задаються номінальні значення частот  $f_{01} = 9999143$  Гц та  $f_{03} = 29879567$  Гц першої та третьої моди колювань двочастотного SC - генератора, нижня границя температурного діапазону  $T = -35$  °C та біти керування синтезатором. Блоки **Display** слугують для виводу вимірюваних значень частот  $f_1$  та  $f_3$ , числа  $N$  на виході лічильника імпульсів та вихідної частоти  $f_{вих}$ . Температурно-частотні залежності  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_3$  двочастотного генератора опорних колювань завдані за допомогою блоків **Function** (рис. 3) і представлені апроксимованими залежностями у вигляді поліномів третього степеня

$$\frac{\Delta f_j(T)}{f_{0j}} = \sum_{i=0}^3 a_{ij} \cdot T^i, \quad i = 1, 3, \quad (3)$$

коефіцієнти яких в порядку спадання індексів мають наступні значення:

$$a_{31} = 0,0001 (1/^\circ C)^3; \quad a_{21} = -0,0224 (1/^\circ C)^2; \quad a_{11} = 1,6528 (1/^\circ C); \quad a_{01} = -28,7442;$$

$$a_{33} = 0,0001 (1/^\circ C)^3; a_{23} = -0,0215 (1/^\circ C)^2; a_{13} = 2,3426 (1/^\circ C); a_{03} = -46,9946.$$

Значення частот  $f_1$  та  $f_3$  з урахуванням температурних відхилень отримуються на виході блоків **Dot Product**, де відбувається перехід до абсолютних величин шляхом множення на значення номінальних частот  $f_{01}$  та  $f_{03}$ .

Для виводу графічних результатів використані блоки **Scope**, зокрема блок  $f_{out}$  відображає форму та частоту вихідного сигналу, а блок  $\Delta f_{out}$  відображає залежність вихідної частоти від температури.

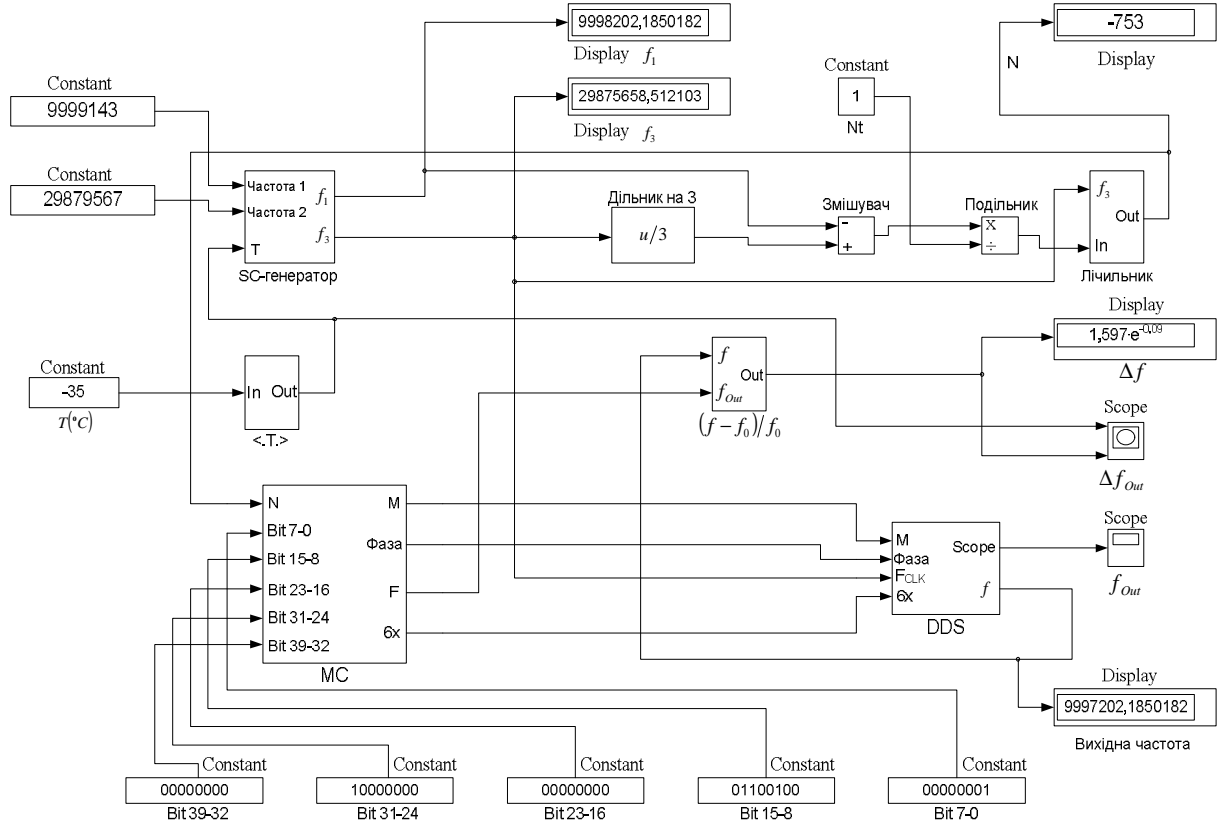


Рис. 2. Модель DDS з компенсацією нестабільності опорної частоти в середовищі Matlab/Simulink

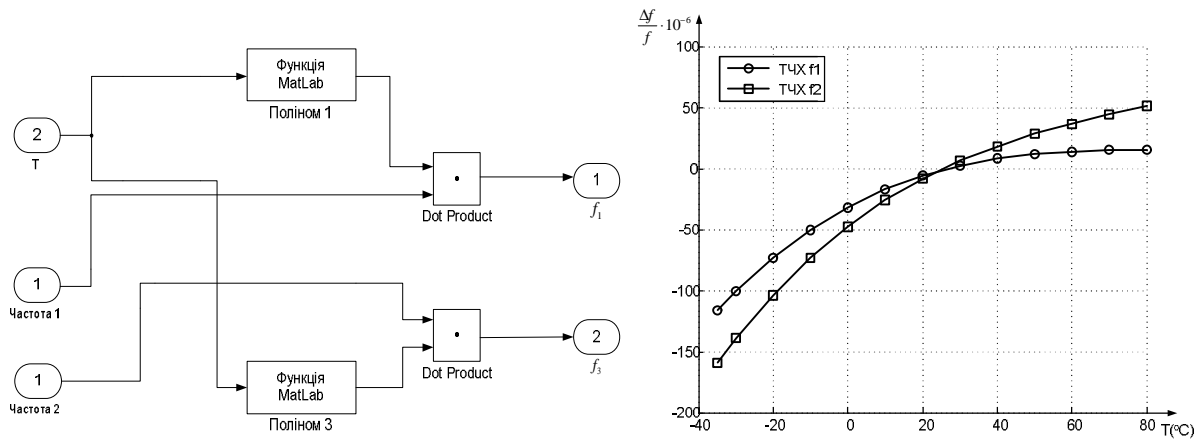


Рис. 3. Реалізація температурно-частотних залежностей  $\Delta f_1, \Delta f_3$  двочастотного генератора опорних коливань в середовищі Matlab/Simulink

На рис. 4 представлена залежність сигналу різницевої частоти  $f_p$  на виході змішувача від температури  $T(^\circ C)$ . Вона являє собою практично лінійну залежність, яка може бути використана для ідентифікації теплового стану кварцового резонатора двочастотного генератора для компенсації його температурної нестабільності. При цьому абсолютна величина крутості перетворення температура – частота складає біля  $70 \frac{Гц}{^\circ C}$ , що більш ніж достатньо для визначення середньої температури кварцового

резонатора з роздільною здатністю менше  $0,1^{\circ}\text{C}$  [2].

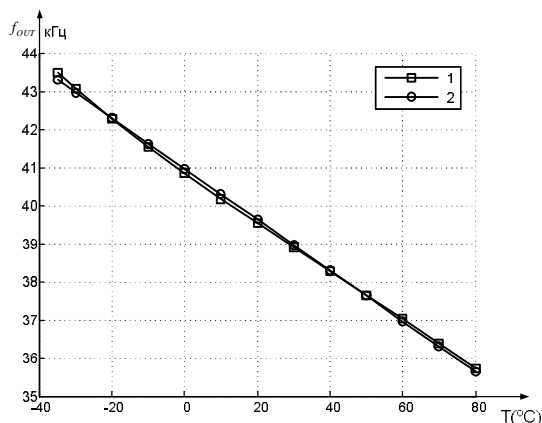


Рис. 4. Графіки реального (1) та апроксимованого (2) відхилення частоти

Таким чином досягнення потенційно можливих точностних характеристик інтегральних DDS можливе лише за високої стабільності вхідної тактової частоти, що вступає в протиріччя з вимогами до масогабаритних показників та енергоспоживання мікроелектронних синтезаторів прямого синтезу.

Використання системи компенсації температурної нестабільності DDS з поточною ідентифікацією теплового стану п'єзореzonатора на основі двочастотного кварцового генератора дозволяє значно покращити точностні характеристики синтезатора та зменшити його час готовності.

#### Література

1. Ридико Л. И. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. – 2001. – № 7. – 18-25.
2. Пидченко С.К. Температурно-динамічні характеристики кварцових п'єзореzonаторів AT- та SC-зрізів / Таранчук А.А., Лаба О.А // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 49-55.
3. Stofanik V. Digitally Temperature-Compensated DDS / Balaz I., Minarik M // Proceedings of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium, pp. 816-819.
4. Stofanik V. An improvement in the temperature-compensated DDS / Balaz I., Minarik M // Proceedings of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium, pp. 662-664.

Надійшла до редакції  
24.6.2010 р.

УДК 681.335

**В.М. КИЧАК, С.Г. БОРТНИК, Н.О. ПУНЧЕНКО**

Вінницький національний технічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕСТОВИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

В роботі проведено аналіз статистичних властивостей тестових сигналів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що можуть використовуватися для контролю характеристик АЦП. Доведено, що найбільш оптимальним типом тестового впливу є багатотональний сигнал.

The analysis of the statistical characteristics test signals for the analog-to-digital converters (ADC), which can be used for the ADC characteristics control, is performed in the work. Proved, that most optimal type of the test signals is multitone signal.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, тестовий сигнал.

#### Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є обов'язковими складовими автоматизованих систем керування технологічними процесами. З кожним роком інтенсивно зростає кількість та номенклатура АЦП з нормованими метрологічними характеристиками. У процесі розробки, виробництва та експлуатації АЦП здійснюється комплекс контрольно-вимірювальних процедур, що забезпечують якість функціонування перетворювачів аналого-код. Усі етапи дослідження характеристик АЦП вимагають використання тестових сигналів. Методи контролю характеристик АЦП розрізняються за рядом ознак, але найбільш важливою є класифікація за видом тестового сигналу. Серед сучасних методів контролю характеристик АЦП найбільш