

**МОДЕЛЬ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ В АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

*У роботі наведено модель фазового дрижання як часової нестабільності фронтів тактового сигналу, яка визначає точність аналого-цифрових перетворювачів телекомунікаційних систем. Розглянуто методику вибору оптимальних параметрів тактових сигналів в аналого-цифровому обладнанні телекомунікаційних систем з швидкодіючими аналого-цифровими перетворювачами.*

*Phase jitter model as time instability of clock signal transition is conducted in the research. The time instability of clock signal transition determines the accuracy of analog-digital converters of telecommunication systems. Choice procedure of optimal parameters of clock signals in analog-digital hardware modules of telecommunication systems with flash encoders is examined.*

Ключові слова: фазове дрижання, аналого-цифровий перетворювач, потужність фазового шуму.

**Вступ**

Цифрові методи зв'язку окрім переваг, зумовлених новими телекомунікаційними технологіями, створили ряд проблем, які виникають при дискретизації та відновленні сигналів. Однією з них є проблема синхронізації тактових імпульсів аналого-цифрового обладнання (АЦО) в телекомунікаційних системах. Основним параметром, який характеризує синхронізацію АЦО є фазове дрижання (ФД) [1]. Причинами виникнення ФД є всі види шумів та завад, а також нестабільність порогу спрацювання компараторів і логічних елементів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Оцінювання ФД дає можливість визначити причини його виникнення та здійснити ряд заходів по зниженню його впливу на якість функціонування телекомунікаційної системи.

Аналізуючи загальну методологію оцінювання ФД тактових імпульсів АЦП слід відмітити, що вона на даний час є на стадії формування [2]. Так, збільшення частоти аналогового вхідного сигналу та розрядності АЦП передбачає підвищення вимог до контролю значення ФД. Складність методології оцінювання ФД знижує ймовірність локалізації причин деградації цифрового потоку і призводить до суттєвого зниження стійкості функціонування телекомунікаційної апаратури. В результаті незначного збільшення ФД відбувається різке зниження якості зв'язку.

Отже, існує необхідність у розробленні моделі ФД тактових сигналів АЦП, яка б забезпечувала високу точність оцінювання відношення сигнал/шум на виході АЦП у заданій смузі робочих частот.

Метою роботи є розроблення моделі ФД тактових сигналів АЦП телекомунікаційних систем, що створює умови для покращення якості зв'язку в цифрових системах передавання інформації. Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати аналіз критеріїв оцінювання ФД тактових сигналів АЦП телекомунікаційних систем;
- запропонувати модель для оцінювання ФД АЦП телекомунікаційних систем;
- виконати аналіз ФД за допомогою оцінювання значення фазового шуму АЦП.

**Аналіз критеріїв оцінювання ФД тактових сигналів АЦП телекомунікаційних систем**

ФД тактових імпульсів є ключовим параметром що визначає роздільну здатність АЦП телекомунікаційної системи. Отже, аналіз ФД тактових сигналів АЦП необхідно проводити з урахуванням розрядності АЦП та частоти вхідного сигналу [3]. Оцінювання впливу ФД на відношення сигнал/шум  $N$ -розрядного АЦП та його динамічний діапазон виконаємо за допомогою виразу [3]:

$$SNR = -20 \log_{10} \sqrt{(2\pi \cdot f_{ex.c} \cdot \varepsilon_{ФД.АЦП})^2 + \left(\frac{1 + \xi_{ФД.м.с}}{2^N}\right)^2}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{ФД.АЦП}$  – значення апертурного ФД АЦП;

$\xi_{ФД.м.с}$  – значення ФД тактового сигналу АЦП;

$f_{ex.c}$  – частота вхідного сигналу АЦП.

На базі виразу (1) можна знайти значення апертурного ФД АЦП:

$$\varepsilon_{ФД.АЦП} = \frac{\sqrt{(10^{-SNR/20})^2 - \left(\frac{1 + \xi_{ФД.м.с}}{2^N}\right)^2}}{2\pi \cdot f_{ex.c}}. \quad (2)$$

Аналіз відношення сигнал/шум АЦП для заданої частоти та амплітуди вхідного сигналу, дає змогу стверджувати, що вплив ФД на роботу АЦО цифрових систем передачі (ІКМ-15/30 та ІКМ-30) буде проявлятися на частоті 10 кГц [4].

З урахуванням принципу синхронізації PDH-систем передачі, який базується на виділенні тактової

частоти із вхідного інформаційного сигналу, оцінювання крутості фронтів тактових імпульсів АЦП необхідно виконувати згідно виразів:

$$V_{n.ф.}(t) = \frac{\Delta U_{n.ф.}(t)}{\Delta t_{n.ф.}}, \quad \Delta U_{n.ф.}(t) = U_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} + \delta_1 \right);$$

$$V_{з.ф.}(t) = \frac{\Delta U_{з.ф.}(t)}{\Delta t_{з.ф.}}, \quad \Delta U_{з.ф.}(t) = U_m \left( e^{-\frac{t}{T}} - \delta_2 \right),$$
(3)

де  $U_m$  – амплітуда тактового сигналу АЦП;  
 $t$  – тривалість імпульсу тактового сигналу АЦП;  
 $T$  – період тактового сигналу АЦП;  
 $\Delta t_{n.ф.}, \Delta t_{з.ф.}$  - відповідно тривалість переднього та заднього фронтів імпульсів синхронізації АЦП;  
 $\delta_1$  – відношення завада/сигнал в момент  $\Delta t_{n.ф.}$  тактового сигналу синхронізації АЦП;  
 $\delta_2$  – відношення завада/сигнал в момент  $\Delta t_{з.ф.}$  тактового сигналу синхронізації АЦП.

Користуючись виразами (2) та (3), побудуємо залежність значення ФД АЦП системи ІКМ-30 від крутості фронту тактового імпульсу (рис. 1).

Як видно з графіка, максимальне ФД спостерігається для крутостей фронтів тактових імпульсів АЦП у межах 0,5...2 В/мкс.

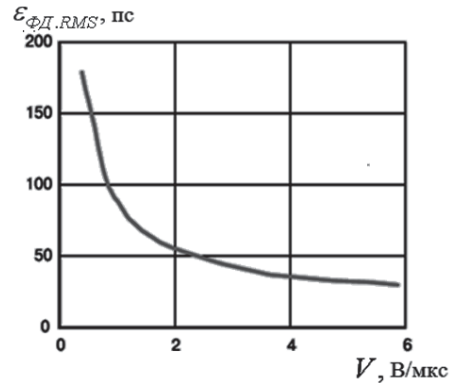


Рис. 1. Залежність середньоквадратичного ФД від часу наростання фронту тактового імпульсу АЦП

**Модель для оцінювання ФД АЦП телекомунікаційних систем**

Для вхідного сигналу АЦО  $S_{\dot{a}\dot{o}}(t) = A_{\dot{a}\dot{o}} \sin(\omega_{\dot{a}\dot{o}} t)$  та послідовності тактових імпульсів АЦП з ФД  $S_{\dot{o}}(t) = A \sin(\omega_{\dot{o}} t) + B \sin(\omega_{\varphi} t)$  можна отримати вираз для вихідного сигналу АЦП з ФД:

$$S_{\dot{a}\dot{o}\dot{\lambda}\dot{o}\dot{i}\dot{\lambda}\dot{o}\dot{\lambda}}(t) = A \sin[\omega_{\dot{o}}(t + \Delta T)] + B \sin[\omega_{\varphi}(t + \Delta T)],$$
(4)

де  $A, B$  – нормовані амплітуди тактового сигналу та фазового шуму АЦП;  
 $\omega_m$  – тактова частота АЦП;  
 $\Delta T$  – значення ФД АЦП;  
 $\omega_{\varphi}$  – частота фазового шуму АЦП.

З урахуванням виразу (4) та умов:

$$S_{вих.АЦП}(t) = A \sin(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_m \Delta T) + A \cos(\omega_m t) \cdot \sin(\omega_m \Delta T) + B \sin(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_{\varphi} \Delta T) + B \cos(\omega_m t) \cdot \sin(\omega_{\varphi} \Delta T);$$
 $B \ll A; \quad t = 0;$

отримаємо остаточний вираз для вихідного сигналу АЦП, що має ФД:

$$S_{вих.АЦП.ФД}(t) = A \omega_m \Delta T + B \sin(\omega_{\varphi} t) + B \omega_{\varphi} \Delta T.$$
(5)

Враховуючи умову  $A \gg B$ , запишемо вираз для оцінювання ФД тактового сигналу АЦП телекомунікаційних систем:

$$\Delta T = \frac{B \sin(\omega_{\varphi} t)}{A \omega_{\dot{o}}}.$$
(6)

З урахуванням ФД тактового сигналу знайдемо вираз для вихідного сигналу АЦП:

$$S_{вих.АЦП} = A_{ex} \sin(\omega_{ex} t) + A_{ex} \cos(\omega_{ex} t) \cdot \omega_{ex} \Delta T.$$
(7)

Підставивши (6) у (7), отримаємо вираз для вихідного сигналу АЦП, за допомогою якого можна знайти значення амплітуд та частот ФД в АЦП телекомунікаційних систем:

$$S_{вих.АЦП} = A_{ex} \omega_{ex} \frac{B}{2A \omega_m} \left\{ [(-\omega_{\varphi} + \omega_{ex}) \cdot t] + [(-\omega_{\varphi} - \omega_{ex}) \cdot t] \right\}.$$
(8)

Виконавши перетворення виразу (8), отримаємо формули для визначення амплітуд та частот ФД на виході АЦП:

$$\varepsilon_{ФД} = \frac{B \cdot f_{ex}}{A \cdot 2 f_m};$$

$$f_{ФД} = f_{ex} \pm (f_{\varphi} - f_m),$$
(9)

де  $f_m$  – частота тактового сигналу АЦП;

$f_{ex}$  – частота вхідного сигналу АЦП.

Вирази (9) показують, що значення амплітуди ФД АЦП залежить від частоти вхідного сигналу.

### Аналіз фазового шуму АЦП

На базі відомих значень детермінованої складової фазового шуму на вході АЦП  $V_{шум.вх.АЦП}$  з урахуванням ФД інформаційного сигналу, визначимо залежність фазового шуму вихідного сигналу АЦП від значення фазового шуму вхідного сигналу АЦП згідно виразу:

$$V_{шум.вих.АЦП} = V_{шум.вх.АЦП} \cdot \left( \frac{dS_{ex}/dt}{dS_m/dt} \right). \quad (10)$$

Виконавши перетворення виразу (10), отримаємо спрощений вираз для визначення вихідного фазового шуму АЦП з урахуванням ФД вхідного сигналу:

$$V_{шум.вих.АЦП} = V_{шум.вх.АЦП} \cdot \frac{S_{ex} \cdot f_{ex}}{S_m \cdot f_m}, \quad (11)$$

де  $S_{ex}$  – амплітуда вхідного сигналу АЦП;

$S_m$  – амплітуда тактового сигналу АЦП.

Визначимо залежність відношення сигнал/шум ідеального АЦП з незкінченою роздільною здатністю від частоти вхідного сигналу та значення ФД тактових сигналів:

$$SNR_{ideal} = \frac{1}{6,02} \left( 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2\pi f_{ex} \epsilon_{ФД}} \right) - 1,76 \right). \quad (12)$$

Враховуючи (12) та вираз для відношення сигнал/шум ідеального АЦП [4]:

$$SNR_{bits} = [6,02N + 1,76], \quad (13)$$

побудуємо графіки залежності ФД від частоти вхідного сигналу та розрядності АЦП (рис. 2).

З рис. 2 видно, що при носійній частоті вхідного сигналу 10 кГц і з використанням 14-розрядного АЦП значення ФД не повинно перевищувати 1 нс.

Відношення сигнал/шум, яке обмежується значенням допустимого середньоквадратичного (СКВ) ФД, залежить від частоти вхідного сигналу та визначається згідно виразу:

$$SNR = -20 \log(2\pi f_{ex} \cdot t_{J.RMS}), \quad (14)$$

де  $t_{J.RMS}$  – СКВ ФД тактових сигналів АЦП.

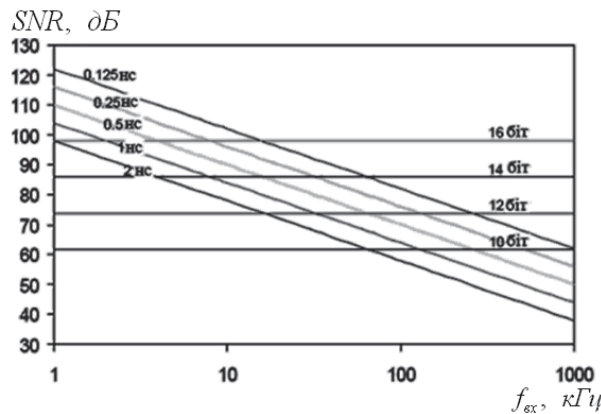


Рис. 2. Залежності ФД АЦП від частоти вхідного сигналу та розрядності

Враховуючи (14), визначимо спектральну густину потужності вихідного сигналу АЦП телекомунікаційної системи згідно виразу:

$$\Phi_{вих.АЦП} = 20 \log_{10}(2\pi \cdot f_{ex} t_{J.RMS}) - 10 \log_{10} \left( \frac{T}{2} \right) - 3 \log \left( \frac{\Delta f}{T/2} \right) - 20 \log \left( \frac{f_{ex}}{f_m} \right), \quad (15)$$

де  $T$  – тривалість вибірки вхідного сигналу АЦП;

$\Delta f$  – діапазон частот вхідних сигналів АЦП.

Отриманий вираз дає змогу оцінити СКВ ФД тактових сигналів АЦП телекомунікаційної системи:

$$t_{J.RMS} = \frac{10^{(\Phi_{вих.АЦП} + 10 \log_{10}(T/2) + 3 \log(\Delta f/(T/2)) + 20 \log(f_{ex}/f_m))/20}}{2\pi \cdot f_{ex}}. \quad (16)$$

Звідси знайдемо спрощений вираз для визначення СКВ ФД тактових сигналів АЦП:

$$t_{J.RMS} = \frac{10^{-SNR/20}}{2\pi f_{ex}}. \quad (17)$$

Підставивши (13) у (17), отримаємо вираз для визначення СКВ ФД АЦП телекомунікаційних систем:

$$t_{J,RMS} = \frac{10^{-(6,02N+1,76)/20}}{2\pi f_{ex}} \quad (18)$$

На рис. 3 представлено залежність, яка дозволяє проаналізувати ФД у заданому діапазоні робочих частот АЦП телекомунікаційних систем.

Графіки, що представлені на рис. 3 дають змогу оцінити допустимі значення ФД тактових сигналів АЦП телекомунікаційних систем у заданому частотному діапазоні вхідних сигналів. На низьких частотах точність роботи АЦП обмежується його розрядністю. Збільшення частоти вхідного сигналу обмежується впливом сумарного ФД системи.

### Висновки

1. Детерміновану складову фазового шуму необхідно визначати за піками спектра вихідного сигналу АЦП. ФД тактових імпульсів АЦП телекомунікаційної системи є ключовим параметром, що визначає роздільну здатність АЦП.

2. Значення швидкості наростання фронту тактового імпульсу залежить від частоти та амплітуди тактового сигналу. Ці параметри тактового сигналу впливають на ФД і в кінцевому результаті визначають якість функціонування цифрових систем передачі.

3. Аналіз ФД тактових сигналів АЦП PDH-систем необхідно виконувати з урахуванням розрядності АЦП та значення частоти вхідного сигналу. При збільшенні частоти вхідного сигналу 14-розрядного АЦП (КМ-15/30) з 50 кГц до 100 кГц, при незмінному відношенні сигнал/шум, спостерігається зменшення значення ФД АЦП з 350 пс до 100 пс відповідно.

### Література

1. Бакланов И.Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2007. – 354 с.
2. Бакланов И.Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, В-ISDM, ATM./ И.Г. Бакланов – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 149 с.
3. Van den Bosch A. A 10-bit 1-GSample Nyquist Current-Steering CMOS D/A Converter // IEEE Journal of Solid State Circuit, – March 2001,- Vol. 36,- No. 3, – P.315-324.
4. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.

Надійшла до редакції  
12.2.2011 р.

УДК 621.397

**Г.Г. БОРТНИК, О.В.СТАЛЬЧЕНКО, В.А. ЧЕЛЮЯН**

Вінницький національний технічний університет  
ВАТ «Укртелеком»

## ШВИДКОДІЙНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК

*У роботі запропоновано швидкодійний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з перекриттям шкал і оптимальним передбаченням сигналу. Розроблено структуру швидкодійного АЦП, що характеризується низькими значеннями динамічних похибок.*

*Fast-acting ADC is in-process offered with ceiling of scales by the optimum prediction of signal. The structure of fast-acting ACP, which is characterized the low values of dynamic errors, is developed.*

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, передбачення сигналів, перекриття шкал.

### Вступ

Динамічні властивості аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) відображають його здатність функціонувати зі змінними у часі вхідними сигналами. У динамічному режимі передатна характеристика АЦП та її параметри суттєво відрізняються від значень, виміряних у статичному режимі випробувань. Реальний крок квантування АЦП може відрізнитися від номінального кроку, заданого при нормуванні параметрів АЦП у статичному режимі. Ця невідповідність виникає внаслідок інерційності та затримки

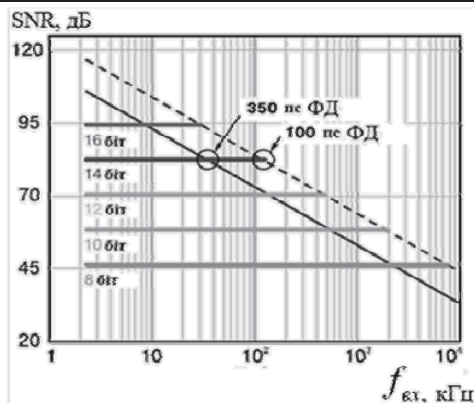


Рис. 3. Залежність відношення сигнал/шум АЦП від частоти вхідного сигналу та ФД