

РОЗДІЛЬЧА ЗДАТНІСТЬ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ НА БАЗІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСТОТИ НА КОД

© Юриш С.Ю. 2009

Описано дослідження роздільної здатності засобів вимірювання частоти на базі сучасних методів перетворення частоти на код, а саме на базі методів зворотної та залежної лічби. Наведено порівняльні метрологічні характеристики класичних і покращаних методів вимірювання, а також результати моделювання роздільної здатності перетворювача частота-код на базі методу залежної лічби у середовищі аналітичних розрахунків Maple 6.

Ключові слова – вимірювання частоти, методи перетворення частоти на код, моделювання роздільної здатності перетворювача.

The resolution analyze for measuring instruments and frequency-to-digital converters based on modern conversion methods such as the ratiometric counting method and the method of the dependent count is described in the article. Comparative metrological performances for classical and advanced methods of measurement and modeling results of resolution for the frequency-to-digital converter based on the method of the dependent count in the Maple 6 software for analytical calculations are given.

Keywords – measuring instruments, conversion methods, modeling results of resolution for the frequency-to-digital converter, Maple 6.

Вступ

Роздільна здатність є найважливішою метрологічною характеристикою перетворювачів частота-код на базі сучасних методів перетворення поряд з похибкою квантування, іноді перетворення, і діапазоном вимірюваних частот. В іноземній англомовній літературі роздільною здатністю (resolution) часто некоректно замінюють поняття відносної похибки вимірювання. На жаль, державні стандарти України, Росії, а також стандарти ЄС не дають визначення роздільної здатності засобів вимірювання. Скористаємося визначенням роздільної здатності, яке наведено в [1]: *роздільна здатність* (“resolution” або “discrimination”) – це мінімальна зміна вимірюваної величини на вході пристрою, яка необхідна для помітної зміни величини на виході. Наприклад, якщо перетворювач частота-код має роздільну здатність 10 Гц, то він може відтворити значення частот 3340 Гц і 3350 Гц, але не 3345 Гц. Якщо ж перетворювач має роздільну здатність 1 Гц, то він може відтворити значення частот 99 Гц і 100 Гц, але не 99,5 Гц. Якісніше перетворення вимагає більшої роздільної здатності.

З метою коректного порівняння різноманітних приладів та перетворювачів частотно-часових параметрів електричних сигналів на базі сучасних методів вимірювання необхідно визначити роздільну здатність, яка, своєю чергою, визначається методом перетворення частоти на код. Ось чому дослідження роздільної здатності перетворювачів частота-код і вимірювальних приладів частотно-часової групи є актуальним завданням сучасної метрології.

Визначення роздільчої здатності засобів вимірювання на базі класичних методів перетворення частоти на код

Вимірювана частота, згідно із класичним **методом вимірювання середньої частоти** протягом фіксованого інтервалу часу T_o визначається за відомою формулою [2]:

$$f_x = \frac{N_x}{T_o}, \quad (1)$$

де N_x – кількість імпульсів вимірюваної частоти, яке нагромаджується в двійковому лічильнику протягом фіксованого зразкового інтервалу часу T_o . Якщо кількість цих імпульсів збільшується на один, частота буде визначатися так:

$$f_{x1} = \frac{N_x + 1}{T_o} \quad (2)$$

Тоді роздільча здатність Q_N засобу вимірювання частоти буде визначатися так:

$$Q_N = f_{x1} - f_x = \frac{1}{T_o} \quad (3)$$

Як видно з формули (3), роздільча здатність перетворювачів частота-код на базі методу вимірювання середньої частоти визначається зразковим інтервалом часу T_o . Більша роздільча здатність вимагає більшого часу перетворення.

При використанні **методу вимірювання миттєвої частоти** вимірюваний період визначається так [3]:

$$T_x = \frac{N_x}{f_o \cdot k}, \quad (4)$$

де N_x – кількість імпульсів високої зразкової частоти f_o , які накопичуються у двійковому лічильнику протягом періоду вимірюваної частоти T_x ; k – кількість періодів вимірюваної частоти T_x , що усереднюються. Тоді роздільча здатність засобів вимірювання періоду на базі методу вимірювання миттєвої частоти буде визначатися за таким виразом:

$$Q_N = T_{x1} - T_x = \frac{1}{f_o \cdot k} \quad (5)$$

Як видно з формули (5), роздільча здатність перетворювачів частота-код на базі методу вимірювання миттєвої частоти визначається зразковою частотою та кількістю періодів, що усереднюються. Більша роздільча здатність вимагає більшої еталонної частоти та кількості вимірюваних періодів.

Визначення роздільчої здатності засобів вимірювання на базі покращаних методів перетворення частоти на код

Покращані методи вимірювання частотно-часових параметрів електричних сигналів дають змогу отримати відносну похибку квантування, яка не залежить від діапазону вимірюваних частот. До основних покращаних методів вимірювання слід зарахувати метод коінциденції [4], метод відносної лічби (ratiometric) [5], метод зворотної лічби (reciprocal) [6], комбінований метод (M/T) [7], метод з постійним часом перетворення (CET) [8], методи з поодинокую (SB) та подвійною буферизацією (DB) [9], метод з прямим доступом до пам'яті (DMA) [10], метод з безнадлишковою зразковою частотою [11] та метод залежної лічби (МЗЛ) [12]. Останній має істотну перевагу перед іншими покращаними методами, тому що забезпечує безнадлишковий час вимірювання і програмовану відносну похибку квантування.

Визначимо, для прикладу, роздільчу здатність засобів вимірювання на базі **методу зворотної лічби** [6]. Часові діаграми методу наведено на рис. 1.

Вимірювана частота згідно з методом зворотної лічби визначається за такою формулою [6]:

$$f_x = \frac{n}{N} \cdot f_0, \quad (6)$$

де n – кількість імпульсів, накопичених у двійковому лічильнику протягом першого зразкового інтервалу T_{01} ; N – кількість імпульсів, накопичених у двійковому лічильнику упродовж другого зразкового інтервалу T_{02} .

Роздільча здатність засобів вимірювання частоти на базі методу зворотної лічби буде визначатися так:

$$Q_N = f_x - f_{x1} = \frac{f_0 \cdot n}{N(N+1)} \quad (7)$$

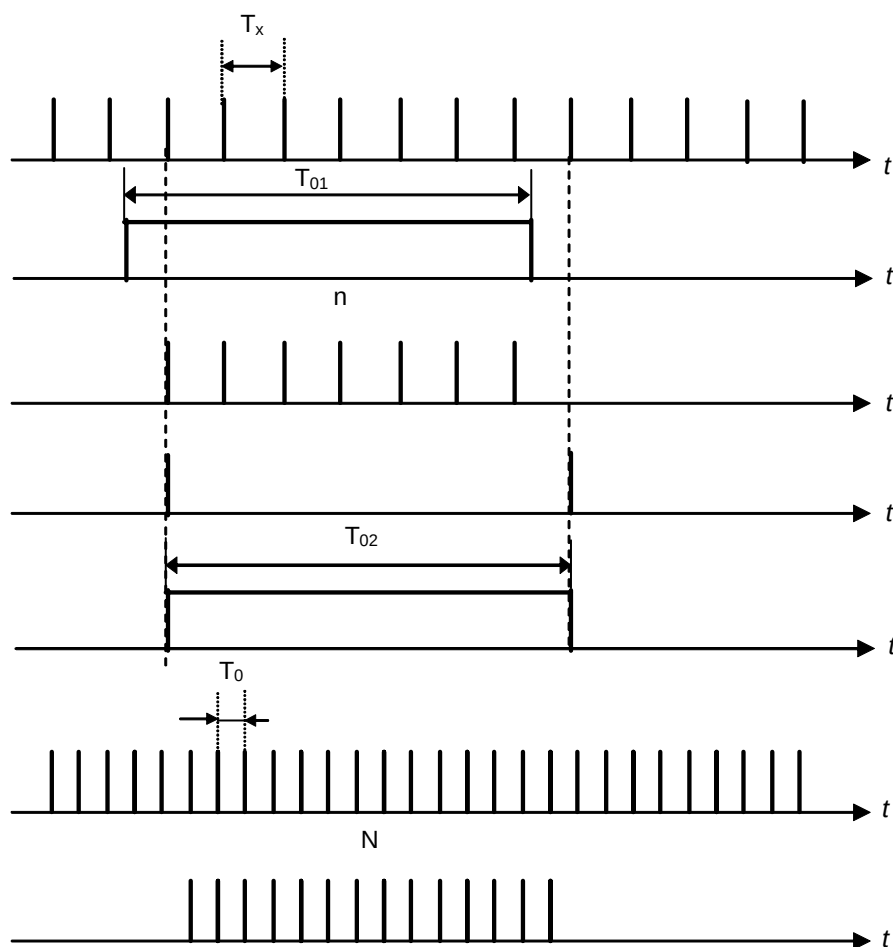


Рис. 1. Часові діаграми методу зворотної лічби

Оскільки

$$n = \frac{T_{01}}{T_x} \text{ і } N = T_{02} \cdot f_0 = n \cdot T_x \cdot f_0, \quad (8)$$

отримаємо:

$$Q_N = \frac{1}{T_x(N+1)} = \frac{f_x}{n \cdot T_x \cdot f_0 + 1} = \frac{f_x}{T_{01} \cdot f_0 + 1} \quad (9)$$

Як видно з формули (9), роздільча здатність перетворювачів частота-код на базі методу зворотної лічби визначається зразковою частотою f_0 та першим зразковим інтервалом часу T_{01} . Більша роздільча здатність вимагає більшої еталонної частоти та більшого зразкового інтервалу часу.

Часові діаграми **методу залежної лічби** наведені на рис.2. Вимірювана частота згідно з методом залежної лічби також визначається за формулою (6), але алгоритм і природа формування чисел n і N інша.

З урахуванням основних виразів для методу залежної лічби [13], а саме:

$$\begin{aligned} t_x &= \frac{n}{f_x} = \frac{N_\delta + \Delta N}{f_0}; \\ N &= N_\delta + \Delta N, \\ N_\delta &= \frac{1}{\delta_q}, \end{aligned} \quad (10)$$

де δ_q – задана похибка квантування, а ΔN змінюється від $\Delta N=0$ до $\Delta N=\Delta N_{\max}$ і

$$\Delta N_{\max} = \frac{f_0}{f_x}, \quad (11)$$

роздільча здатність засобів вимірювання частоти на базі методу залежної лічби буде визначатися за такою формулою:

$$Q_N = \frac{f_0 \cdot n}{N(N+1)} = \frac{f_x}{(N+1)} = \frac{f_x}{(N_\delta + \Delta N + 1)} \quad (12)$$

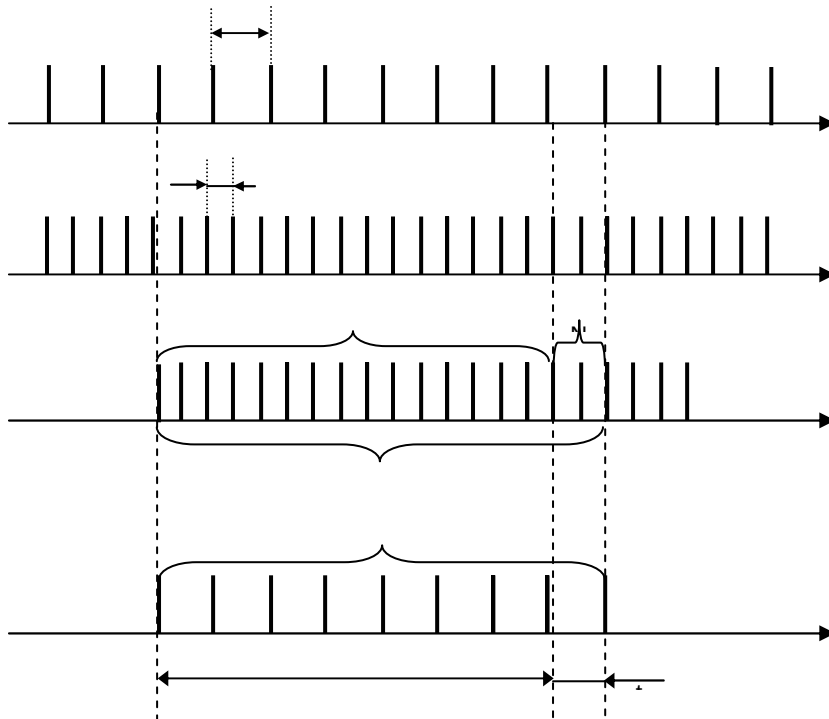


Рис. 2. Часові діаграми методу залежної лічби

З урахуванням діапазону зміни числа $\Delta N \in [0 \div \Delta N_{\max}]$ отримаємо:

$$Q_N = \begin{cases} \frac{f_x}{(N_\delta + 1)}, & \Delta N = 0 \\ \frac{f_x}{(N_\delta + \Delta N_{\max} + 1)} = \frac{f_x}{(N_\delta + \frac{f_0}{f_x} + 1)}, & \Delta N = \Delta N_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

Роздільча здатність для методу залежної лічби визначається заданою похибкою квантування $\delta_q = 1/N_\delta$ і вимірюваною частотою f_x . Роздільча здатність є програмованою, а час вимірювання, який визначається потрібною похибкою квантування, є безнадлишковим порівняно з класичним методом вимірювання середньої частоти та іншими покращаними методами.

У табл. 1 наведено порівняльні метрологічні характеристики двох класичних методів перетворення частоти на код, а також методу зворотної лічби і методу залежної лічби.

Програмована роздільча здатність є істотною перевагою методу залежної лічби, оскільки існує багато застосувань засобів вимірювання і перетворення частоти, де ця властивість методу може бути ефективно використана. Наприклад, при проектуванні адаптивних частотних реле деякі частоти повинні вимірюватися з більшою роздільчою здатністю.

Таблиця 1

Порівняльні метрологічні характеристики методів перетворення частоти на код

Метод	Вираз для обчислення частоти f_x або періоду T_x	Похибка квантування δ_q	Роздільча здатність Q_N
Метод вимірювання середньої частоти	$f_x = \frac{N_x}{T_o}$	$\frac{1}{T_o \cdot f_x}$	$\frac{1}{T_o}$
Метод вимірювання миттєвої частоти	$T_x = \frac{N_x}{f_o \cdot k}$	$\frac{f_x}{f_o \cdot k}$	$\frac{1}{f_o \cdot k}$
Метод зворотної лічби	$f_x = \frac{n}{N} \cdot f_o$	$\frac{1}{T_{01} \cdot f_o}$	$\frac{f_x}{T_{01} \cdot f_o + 1}$
Метод залежної лічби	$f_x = \frac{n}{N} \cdot f_o$	$\frac{1}{N_\delta}$	$\frac{f_x}{(N_\delta + \Delta N + 1)}$

Результати моделювання роздільчої здатності перетворювача частота-код на базі МЗЛ

Моделювання роздільчої здатності здійснювалося для розробленого і впровадженого автором універсального перетворювача частота-код (UFDC-1) [14–15], в якому використовується метод залежної лічби. Зразкова тактова частота f_0 перетворювача дорівнює 500 кГц. З метою досягнення максимальної наочності результатів моделювання був вибраний частотний діапазон перетворення $f_x \in [0.05 \div 100]$ Гц, а $N_\delta \in [100 \div 10000]$. Останнє відповідає відносній похибці квантування $\delta_q \in [0.01 \div 0.0001]$. Моделювання виконане в середовищі аналітичних розрахунків *Maple 6* [16].

Результати моделювання роздільчої здатності для випадків $\Delta N=0$ і $\Delta N=\Delta N_{\max}$ наведені на рис. 3 і 4 відповідно.

Залежність роздільчої здатності від вимірюваної частоти проявляється, переважно, якщо $\Delta N=\Delta N_{\max}$. Найяскравіше проявляється залежність роздільчої здатності від числа N_δ що дає змогу будувати засоби вимірювання частоти на основі методу залежної лічби з програмованою роздільчою здатністю.

Порівняно з методом зворотної лічби те саме значення роздільної здатності з використанням МЗЛ досягається при безнадлишковому часі перетворення. А саме для досягнення роздільної здатності в 1 Гц час перетворення при використанні методу зворотної лічби становить $2 \cdot 10^{-4}$ с. Однак для досягнення більш-менш достатньої похибки квантування цей час реально вибирають набагато більшим, наприклад, 1 с. Цей зразковий інтервал часу не змінюється протягом вимірювань. Тому він є надлишковим для досягнення роздільної здатності в 1 Гц. В МЗЛ похибка квантування і роздільна здатність є програмованими і можуть змінюватися протягом вимірювань залежно від потрібної похибки або роздільної здатності. Тому час перетворення у разі використання МЗЛ є безнадлишковим для досягнення роздільної здатності в 1 Гц.

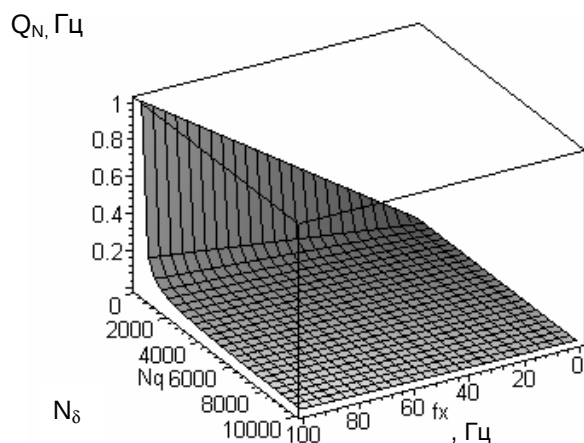


Рис. 3. Залежність роздільної здатності Q_N від числа N_δ і вимірюваної частоти f_x при $\Delta N = 0$

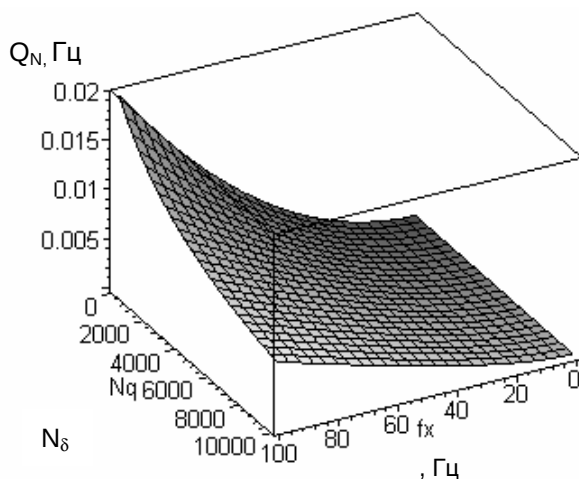


Рис. 4. Залежність роздільної здатності Q_N від числа N_δ і вимірюваної частоти f_x при $\Delta N = \Delta N_{max}$

Висновок

Роздільна здатність є найважливішою метрологічною характеристикою перетворювачів частота-код на базі сучасних методів перетворення поряд з похибкою квантування, часом перетворення і діапазоном вимірюваних частот. Разом з такими перевагами методу залежної лічби, як постійність відносної похибки квантування у всьому діапазоні вимірювальних частот, програмована похибка квантування і безнадлишковий час перетворення, цей метод забезпечує також програмовану роздільну здатність. Порівняно з методом зворотної лічби те саме значення роздільної здатності при

використанні МЗЛ досягається за безнадлишкового часу перетворення. Ця властивість методу може бути ефективно використана, наприклад, для створення адаптивних частотних реле, різноманітних засобів вимірювання частоти, а також цифрових сенсорів на базі UFDC-1.

1. Pallàs-Areny R., Webster J. *Sensors and Signal Conditioning*. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 587 p.
2. Ермолов Р. С. *Цифровые частотомеры*. – Л.: Энергия, 1973. – 152 с.
3. Кирианаки Н.В., Дудыкевич В.Б. *Методы и устройства цифрового измерения низких и инфранизких частот*. – Львов: Вища школа, 1975. – 188 с.
4. Орнатский П. П., *Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые)*. – К.: Вища школа, 1986. – 504 с.
5. Burr-Brown IC applications handbook, USA, 1994. – 426 p.
6. Мирский Г.Я. *Электронные измерения*. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
7. Ohmae T., Matsuda T., Kamiyama K., Tachikawa M. A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 1982. – Vol. IE-29, № 3. – P. 207–211.
8. Bonet R. Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1989. – Vol.38, № 6. – P. 1104–1108.
9. Prokin M. Double buffered wide-range frequency measurement method for digital tachometers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1991. – Vol.40, № 3. – P. 606–610.
10. Prokin M. DMA Transfer Method for wide-range speed and frequency measurement // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1993. – Vol.42, № 4. – P. 842–846.
11. Yurish S. Y., Kirianaki N. V., Shpak N. O. Accurate method of frequency-time measurement with non-redundant reference frequency // *Proc. International Conf. on Actual Problems of Measuring Technique (Measurement-98)*. – Kiev (Ukraine). – 1998. – P. 78–79.
12. Способ измерения частоты и периода гармонического сигнала и устройство для его осуществления: А.с. 788018 СССР, G01R 23/00. / Н.В. Кирианаки, Б.М. Березюк (СССР), Бюл. № 46, 1978.
13. Kirianaki N.V., Yurish S.Y., Shpak N. O. New processing methods for microcontrollers compatible sensors with frequency output // *Proc. of the 12th European Conference on Solid-State Transducers and the 9th UK Conf. on Sensors and their Applications*. – Southampton (UK). – 1998. – P. 883–886.
14. Yurish S.Y., Kirianaki N.V., Pallàs-Areny R. Universal frequency-to-digital converter for quasi-digital and smart sensors: specifications and applications // *Sensor Review*. – 2005. – Vol. 25, No.2. – P.92–99.
15. Universal Frequency-to-Digital Converter (UFDC-1): Specification and Application Notes, IFSA. – Toronto, 2004. – 21 p.
16. Дьяконов В. Maple 6: Учебный курс. – Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 608 с.