

2. Отримана залежність (13) дає можливість знайти оптимальне значення коефіцієнта нахилу лінії регресії, оскільки явно враховує непевності  $u(x)$ ,  $u(y)$  результатів вимірювань обох величин.

3. Ця залежність є узагальненням залежностей для коефіцієнтів нахилу інших відомих регресій, які є частковими випадками дослідженої регресії: коефіцієнт нахилу прямої регресії отримують для  $u(x)=0$  ( $d_{u(x)}=0$ ), зворотної – для  $u(y)=0$  ( $d_{u(y)}=0$ ), середньгеометричної – при  $u(x)/S_x = u(y)/S_y$  ( $d_{u(x)} = d_{u(y)}$ ) і ортогональної – для  $u(x)/u(y) = |a_1|$ .

4. Лінійні масштабні перетворення вхідної та вихідної величин у регресії з оптимальним коефіцієнтом нахилу не спричиняють ніяких нелінійних наслідків.

1 Дорожовець М., Стадник Б., Мотало В. та ін. *Основи метрології. Підручник. Основи метрології і вимірювальна техніка. Т. 1.* – Львів: Вид. НУ “Львівська політехніка”, 2005. – 532 с. 2. Draper N.R. and H. Smith. *Applied Regression Analysis.* Wiley & Sons, New York, 1973. 3. Fisz M. *Probability Theory and Mathematical Statistics.* John Willey & Sons, London, 1963. 4. *Handbook of Applicable Mathematics. Vol. VI: Statistics.* Edited by E. Lloyd and W. Ledermann, John Willey & Sons, Chichester -New York-Brisbane-Singapore, 1984. 5. Kramer H. *Mathematical Methods of Statistics.* Stockholm, 1946. 6. M. G. Kendall and A. Stuart. *The Advanced Theory of Statistics, Volume Two.* Charles Griffin and Co Ltd, London, Third edition, 1973. 7. J.W. Gillard. *An Historical Overview of Linear Regression with Errors in Both Variables.* School of Mathematics, Senghenydd Road, Cardiff University, 2006. 8. Львовский Е. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул.* – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с. 9. Дорожовець М. М. *Дослідження непевності коефіцієнтів та прогнозованих значень лінійної ортогональної регресії. Відбір і обробка інформації.* 2007. Вип. 27 (103). – С. 24–31. 10. *Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement.* ISO 1993. – 1995.

УДК 681.335 (088.8)

Б.О. Католик<sup>1</sup>, З.Р. Мичуда<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра комп’ютеризованих систем автоматички,  
<sup>2</sup>Політехніка Сьвентокжиска в Кельцах, Польща

## ІНТЕРПОЛЯЦІЙНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ЛОГАРИФМІЧНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ. ОГЛЯД. ЧАСТИНА 2

© Католик Б.О., Мичуда З.Р., 2008

**Запропоновано критерії оцінки точності та класифікацію, виконано порівняльний аналіз властивостей та вказано перспективи розвитку інтерполяційних АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення.**

**The criteria of valuation of accuracy and classifications are offered, the comparative analysis of properties is conducted and the prospects of development interpolation ADC with logarithmic characteristic of conversion.**

**1. Інтерполяційні ЛАЦП.** Позбутися недоліків КЛАЦП можна, замінивши лінійну інтерполяцію показниковою, що зроблено у роботах [2, 3].

Запропонований в [2] ЛАЦП на комутованих конденсаторах був першим інтерполяційним ЛАЦП. Його функціональна схема наведена на рис. 1, де позначено: ГТІ – генератор тактових імпульсів, ФПІ – формувач імпульсних послідовностей, ОВ – одновібратор, ДОН – джерело опорної напруги, Км – компаратор, РЗ – регістр зсуву, КШ – аналоговий ключ підвищеної

швидкодії, ОП – операційний підсилювач, К – ключ, С<sub>д</sub> – дозуючий конденсатор, С<sub>н1</sub> і С<sub>н2</sub> – перший і другий накопичуючі конденсатори, БФПФ – блок формування показникової функції, Т – тригер, І – елемент збігу, Ф1 і Ф2 – відокремлені паузами імпульсні послідовності, вихід 1 і 2 – інформаційні виходи старших і молодших розрядів, КП – вихід "Кінець перетворення".

Для підвищення точності ЛАЦП на кожній ділянці здійснюється показникова розгортка компенсаційної напруги.

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування ( $\delta_k$ ) на ділянці, знайдемо мінімальне значення основи логарифма за формулою

$$\zeta_{\min} = \frac{1}{1 + \delta_k}.$$

Абсолютна похибка перетворення ( $\Delta$ ) дорівнює різниці між передостаннім рівнем компенсаційної напруги на другій ділянці ( $U_2$ ) та вхідним сигналом,  $\Delta = U_2 - U_{\text{вх}}$  і не перевищує значення

$$\Delta = \delta_2 U_{\text{вх}}.$$

Задаючи на першій ділянці відносну похибку квантування  $\delta_1 = 10\%$ , визначимо за формулою (6) коефіцієнт дозування  $\zeta_1 = 0,9090909$ ; аналогічно на другій ділянці для  $\delta_2 = 0,1\%$  знайдемо  $\zeta_2 = 0,99990009$ .

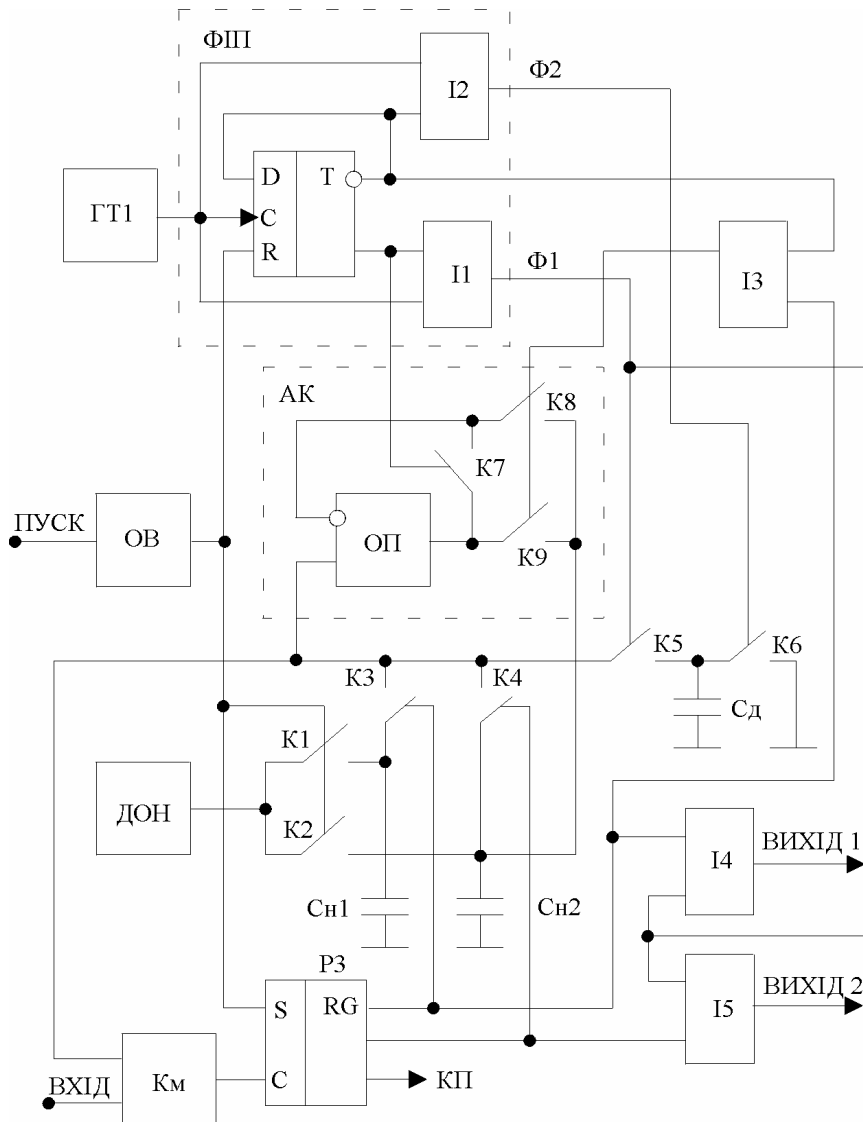


Рис. 1. Функціональна схема найпростішого інтерполяційного ЛАЦП

Оскільки коефіцієнту дозування  $\zeta_1 = 0,9090909$  відповідає кількість дозувань  $N_1 = 97$  для діапазону зміни вхідного сигналу від 1 мВ до 10 В, то для більшої зручності подання результату перетворення прийmemo  $N_1 = 100$  і уточнимо коефіцієнт дозування та відносну похибку квантування  $\zeta_1 = 0,9120108$  і  $\delta_1 = 9,6\%$ .

Аналогічно уточнимо для другої ділянки:  $N_2 = 100$ ;  $\zeta_2 = 0,9990794$  і  $\delta_2 = 0,1\%$ .

Остаточно результат перетворення  $N$  дорівнює сумі проміжних результатів перетворення на окремих ділянках і для приведення його до значення одиниці молодшого розряду кількість дозувань на першій ділянці  $N_1$  треба помножити на 100, оскільки між будь-якими двома рівнями компенсаційної напруги на першій ділянці поміщається 100 рівнів компенсаційної напруги другої ділянки:

$$N = 100N_1 + N_2 \quad \text{або} \quad N = \frac{100}{\log \zeta_1} \log \frac{U_{\text{вх}}}{U_0} + \frac{1}{\log \zeta_2} \log \frac{U_{\text{вх}}}{U_1},$$

де  $U_1$  – передостаннє значення компенсаційної напруги на першій ділянці.

Отже, для перетворення вхідного сигналу 1 мВ – 10 В з похибкою квантування  $\delta$ , не більшою за 0,1 % у розробленому в роботі [2] ЛАЦП час перетворення не перевищує 200 періодів тактової частоти (тоді як у ЛАЦП послідовної лічби їх необхідно 10000), тобто швидкодія підвищується у 50 разів.

За рахунок значного зменшення кількості дозувань істотно зменшується інструментальна похибка від впливу паразитних ємностей і струмів витікання ключів. Так, при наведених вище даних у ЛАЦП послідовної лічби вона сягає 0,35 %, а у розробленому в роботі [2] найпростішому інтерполяційному ЛАЦП (рис. 1) не перевищує 0,04 %.

У разі використання розглянутого вище інтерполяційного ЛАЦП (рис. 1) деякі незручності та схемні ускладнення створює необхідність відтворення рівня напруги на накопичуючому конденсаторі, що передував рівню спрацювання компаратора.

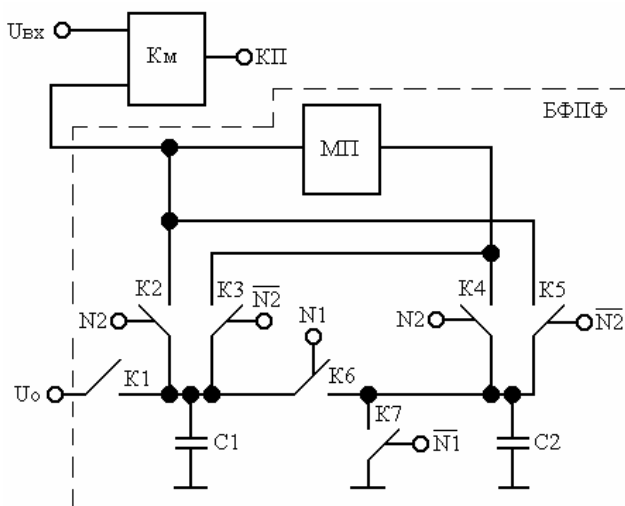


Рис. 2. Спрощена схема інтерполяційного ЛАЦП

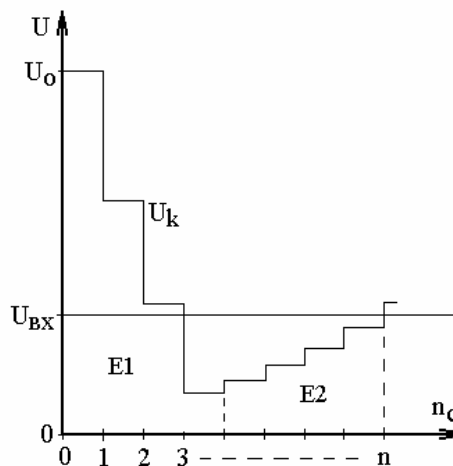


Рис. 3. Етюри напруг інтерполяційного ЛАЦП

Щоб уникнути цього недоліку, авторами була розроблена [3] функціональна схема інтерполяційного ЛАЦП (рис. 2), який ґрунтується на явищі перерозподілу заряду на ділянці грубого перетворення та явищі накопичення заряду на ділянці точного перетворення. Суть принципу дії розкриємо за допомогою спрощеної схеми (рис. 2) та епюру напруг (рис. 3).

У схему інтерполяційного ЛАЦП (рис. 8) входять компаратор (Км), джерело опорної напруги  $U_0$  і блок формування показникової функції (БФПФ), який містить конденсатори  $C_1$  і  $C_2$ , ключі

(К1-К7) і масштабний перетворювач (МП). На входи управління ключів подаються імпульсні послідовності N1 і N2 (від схеми управління, яка на рисунку не показана).

На рис. 3 позначено:  $U_k$  і  $U_{вх}$  – компенсаційна і вхідна напруги; E1 і E2 – перша і друга ділянки перетворення;  $n_c$  – кількість імпульсів.

Ємності конденсаторів вибираються так, щоб забезпечити потрібне значення кроку квантування на першій ділянці, причому  $C1 \gg C2$ . З кожним тактовим імпульсом (імпульсної послідовності N1) значення компенсаційної напруги зменшується і на деякому такті переходить через рівень вхідного сигналу, в результаті чого спрацьовує компаратор (переходить у стан логічної одиниці на виході) і закінчується перетворення на першій ділянці. Результат перетворення на першій ділянці дорівнює кількості імпульсів N1, що надійшли на вхід управління К6 від моменту запуску до спрацювання компаратора:

$$N_1 = \frac{1}{\ln \zeta} \ln \frac{U_{вх}}{U_o},$$

$$\text{де } \zeta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

З наступним тактовим імпульсом після переходу компаратора у стан логічної одиниці розпочинається перетворення на другій ділянці.

Коефіцієнт перетворення на другій ділянці задається зміною коефіцієнта передачі масштабного перетворювача МП; при виконанні МП у вигляді неінвертуючого підсилювача – зміною значення опорів згідно з формулою:

$$\alpha = 1 + \frac{R2}{R1},$$

де R2 – опір резистора, увімкненого між виходом та інвертуючим входом операційного підсилювача; R1 – опір резистора, увімкненого між інвертуючим входом операційного підсилювача та шиною нульового потенціалу.

Після деякого тактувального імпульсу компенсаційна напруга пройде через рівень вхідної і компаратор перейде на рівень логічної одиниці на виході. Цей момент є закінченням перетворення на другій ділянці, результатом якого є кількість імпульсів N2, що надійшли на вхід управління ключів К2, К4 між двома спрацюваннями компаратора:

$$N_2 = \frac{1}{\ln \alpha} \ln \frac{U_{вх}}{U_1},$$

де  $U_1$  – останнє значення компенсаційної напруги на першій ділянці.

Задаючи кількість кроків квантування N1 і N2 відповідно на першій і другій ділянках, можна визначити необхідне для цього значення основи логарифма ( $\zeta$  і  $\alpha$ ):

$$\zeta = e^{\frac{1}{N_1} \cdot \ln \frac{U_{вх}}{U_o}} \quad \text{і} \quad \alpha = e^{\frac{1}{N_2} \cdot \ln \frac{U_{вх}}{U_1}}.$$

Після закінчення перетворення на кожній ділянці значення компенсаційної напруги на виході БФПФ буде відповідно

$$U_1 = \zeta^{N_1} * U_o \quad \text{і} \quad U_2 = \alpha^{N_2} * U_o,$$

а приріст становитиме

$$\Delta U_1 = \zeta^{N_1} * (\zeta - 1) * U_o \quad \text{і} \quad \Delta U_2 = \alpha^{N_2} * (\alpha - 1) * U_o.$$

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування ( $\delta_d$ ), знайдемо мінімальне значення основи логарифма на кожній ділянці:

$$\zeta_{\min} = \frac{1}{1 + \delta_{1д}} \quad \text{і} \quad \alpha_{\min} = \frac{1}{1 - \delta_{2д}}.$$

Задаючи на першій ділянці допустиме значення відносної похибки квантування  $\delta_{1д} = 10\%$ , визначимо основу логарифму  $\zeta = 0,9090909$ ; аналогічно на другій ділянці для  $\delta_{2д} = 0,1\%$  знайдемо  $\alpha = 1,001001$ .

Остаточню результат перетворення  $N$  дорівнює

$$N = 100 * N_1 - N_2 \quad \text{або} \quad N = \frac{100}{\log \zeta} * \log \frac{U_{ВХ}}{U_0} - \frac{1}{\log \alpha} * \log \frac{U_{ВХ}}{U_1} .$$

Отже, для перетворення вхідного сигналу 1 мВ – 10 В з похибкою квантування  $\delta$ , не більшою за 0,1 %, у розробленому [3] інтерполяційному ЛАЦП з перерозподілом і накопиченням заряду час перетворення не перевищуватиме 200 періодів тактової частоти.

**4. Висновки.** На основі виконаного огляду інтерполяційних АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення можна стверджувати таке:

1. Інтерполяційні КЛАЦП [7, 8, 9] мають істотний недолік, який полягає в тому, що на ділянці точного перетворення логарифмічна характеристика апроксимується лінійною функцією, внаслідок чого виникає значна похибка невідповідності логарифма, яка досягає 0,25–0,5 %, і результуюча похибка таких ЛАЦП, звичайно, не менша за 0,6–1,0 %.

2. Інтерполяційні ЛАЦП на комутованих конденсаторах [3,5] забезпечують високу точність перетворення, їхня похибка квантування зменшена до 0,1 %, а інструментальна похибка не перевищує 0,04 %.

3. Інтерполяційні ЛАЦП на комутованих конденсаторах з перерозподілом і накопиченням заряду мають метрологічні характеристики, типові для ЛАЦП з перерозподілом заряду, але зручніші у реалізації та налагодженні.

1. Мичуда З.Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього. – Львів: Простір, 2002. – 242 с. 2. Мичуда З.Р. Підвищення точності та швидкодії послідовних логарифмічних АЦП з перерозподілом заряду // Книга за матеріалами 4-ї міжнародної НТК "Контроль і управління в технічних системах". У 3-х томах. Т.2. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997. – С.131–136. 3. Католик Б.О., Мичуда З.Р., Мичуда Л.З. Інтерполюючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – Л.: НУЛП, 2002. – Вип. 445. – С. 160–166. 4. Патент 43364 Україна. Спосіб логарифмічного аналого-цифрового перетворення/ Мичуда З.Р., 2001. – Бюл. № 11. 5. Ямный В.Е. Аналого-цифровые преобразователи напряжений в широком динамическом диапазоне. – Мн.: Изд-во БГУ, 1980. – 192 с. 6. А.с. 1164744 СССР. Способ логарифмического преобразования напряжения в код и устройство для его осуществления / Г.А. Капитанов, 1985, Бюл. № 24. 7. А.с. 512475 СССР. Логарифмический преобразователь/ В.Д. Циделко, В.А. Тесленко. – 1976. – Бюл. № 16.