

Л. Б. Петришин

## ДВОКВАДРАНТНЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ МОНТЕ-КАРЛО

AGH науково-технологічний університет, Краків, Польща

**Анотація.** В сучасних умовах технологічного розвитку та за минулорічних обставин застосування мобільних засобів віддаленого контролю та перетворення інформації є обґрунтоване зручністю застосування, надійністю, безпекою операторів-пілотів та економічною ефективністю. Актуальним завданням дослідження є розробка та впровадження ефективних методів та засобів аналого-цифрового перетворення. В системах управління ряд джерел інформації мають характер інтегрального накопичення миттєвих значень параметру. Обґрунтовано, що для перетворення такої інформації ефективним є метод статистичних досліджень Монте-Карло. Застосування такого методу було обмежено потребою реалізації генераторів псевдовипадкових кодових послідовностей із рівномірним розподілом. Запропонована в статті розробка методу аналого-цифрового перетворення Монте-Карло базувалась на застосуванні кодових впорядкувань, породжених рефлексивно відображеними функціями Радемахера. Проведені дослідження показали одні з кращих показники рівномірності розподілу відліків сигналу сканування аналого-цифрових перетворювачів Монте-Карло. На базі запропонованого методу генерування псевдовипадкових кодових послідовностей із рівномірним розподілом вперше розроблено цифрові генератори-формувачі сигналів віднесення у складі аналого-цифрових перетворювачів Монте-Карло. Розроблена та досліджена схема аналого-цифрового перетворювача Монте-Карло, який здійснює двоквадрантне аналого-цифрове перетворення роздільно «+» та «-» складових перетворюваного сигналу, а також його інтегрального значення. Наведено осцилограми та часові діаграми формування числових імпульсів, як результату перетворення. Запропонований метод та пристрій аналого-цифрового перетворення Монте-Карло мають перспективу застосування в системах обліку споживання ресурсів, зокрема, облік електричної енергії, палива, газу, води та інших носіїв.

**Ключові слова:** аналого-цифрове перетворення, Монте-Карло, імовірність.

**Abstract.** In the current conditions of technological development and under last year's circumstances, the use of mobile means of remote control and information transformation is justified by ease of use, reliability, safety of pilot operators and economic efficiency. An urgent task is the development and implementation of effective methods and means of analog-digital conversion. In control systems, a number of sources of information have the character of integral accumulation of instantaneous parameter values. It is substantiated that the method of Monte Carlo statistical research is effective for the transformation of such information. The application of this method was limited by the need to implement generators of pseudo-random code sequences with a uniform distribution. The development of the Monte Carlo analog-to-digital conversion method proposed in the article was based on the application of code orderings generated by reflectively mapped Rademacher functions. The conducted studies showed one of the best uniformity distribution indicators of the scanning signal of the analog-to-digital Monte Carlo converters. Based on the proposed method of generating pseudo-random code sequences with uniform distribution, digital generators-formers of reference signals as part of Monte Carlo analog-to-digital converters were developed for the first time. The circuit of the Monte Carlo analog-to-digital converter, which carries out two-quadrant analog-to-digital conversion separately of the "+" and "-" components of the converted signal, as well as its integral value, was developed and investigated. A Monte Carlo analog-to-digital conversion scheme has been developed. Oscillograms and time diagrams of the formation of numerical pulses as a result of the conversion are given. The proposed Monte Carlo analog-to-digital conversion method and device have the prospect of application in resource consumption accounting systems, in particular, accounting for electric energy, fuel, gas, water, and other media.

**Key words:** analog-digital conversion, Monte Carlo, probability.

**DOI:** <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-58-65>.

### Вступ

Перетворення форми інформації є однією із основних системних функцій в системах керування аеромобільними системами моніторингу (АМСМ). Техніка безпілотного керування накладає жорсткі вимоги щодо оперативного контролю параметрів АМСМ, серед яких визначено параметри із необхідним контролем як поточних значень в режимі реального часу, так і їх інтегральних величин [1-11]. Із множини таких параметрів слід виділити параметри контролю забортової інформації, перетворення якої здійснює АМСМ, а також техніко-економічних характеристик функціонування самого АМСМ.

Перевагою застосування АМСМ є безпечний для пілота-оператора автоматизований процес моніторингу екологічного забруднення чи вимірювання розподілів параметрів атмосфери в просторі. Інформація про просторові розподіли фізико-хімічних параметрів атмосфери необхідна для забезпечення безпеки польотів авіаційної і космічної техніки, моніторингу екологічного стану навколишнього середовища в умовах надзвичайних ситуацій, метеорологічного забезпечення екологічно небезпечних об'єктів. Вона також необхідна для прогнозування поширення забруднюючих домішок, оцінки наслідків аварій на атомних станціях і хімічних підприємствах, лісових пожеж та оптимізації заходів щодо їх подолання [1, 2, 7, 9-11]. Іншим прикладним аспектом є математичне моделювання екологічних ситуацій, атмосферних явищ і прогнозів погоди. Контроль параметрів атмосфери поблизу земної поверхні не дозволяє отримати повну і достовірну інформацію про екологічний і метеорологічний стан навколишнього середовища. Натомість АМСМ дозволять здійснити вимірювання просторових розподілів сукупності екологічних і метеорологічних параметрів атмосфери та оперативно передавати їх в систему обробки даних. На борту АМСМ встановлюють прилади для визначення газового і аерозольного складу атмосфери, концентрації забруднюючих домішок, радіаційного фону, апаратуру для точного визначення нижніх і верхніх меж хмарності, електрофізичних параметрів атмосфери та системи оперативного інфообміну. Використання контактних методів перетворення фізико-хімічних параметрів на борту АМСМ дозволяє

проводити вимірювання розподілу параметрів атмосфери з максимально можливою точністю, з високою просторовою роздільною здатністю в режимі реального часу [2, 3, 6, 11]. Аналого-цифрове (АЦ) перетворення поточних та інтегрованих значень таких параметрів, особливо екологічного, хімічного та радіаційного забруднення, є актуальним завданням технічної реалізації засобів первинного перетворення форми вхідної інформації.

### Актуальність

Необхідність моніторингу та документування техніко-економічних характеристик АМСМ зумовлена переходом на безперервну інформаційну підтримку літальних апаратів виробниками протягом усього їх життєвого циклу. Метою такого електронного контролю є безпаперове формування інформаційної моделі програмно-технічного комплексу, що включає визначені дані про його експлуатацію з урахуванням міжнародних стандартів [3, 4, 8, 10]. В техніці АМСМ **актуальним** постає завдання створення системи рушіїв з високим ККД для задоволення вимог щодо енергетичної ємності і питомої потужності при забезпеченні максимальної тривалості і скритності переміщення в просторі. Розробляються та впроваджуються енергетичні технології з використанням альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної енергії, акумуляторів надвеликої питомої ємності, паливних елементів. Забезпечення надійної експлуатації багатороторних АМСМ та оперативне діагностування потенційних насправностей передбачають здійснення оперативного контролю поточних та інтегральних характеристик споживання енергії чи палива кожного із двигунів, фіксування режимів асиметрії енергоспоживання на режимах стабільного польоту та перехідних режимах [1-4, 8, 11]. Важливим є показник інтегрованого споживання енергії силовою установкою АМСМ за висотою профілю польоту – підйом/зниження.

### Мета

**Метою** проведеного дослідження було опрацювання методів та бортових засобів АЦ перетворення вхідної інформації АМСМ із формуванням цифрових значень параметрів реального часу, а також автоматичне інтегрування та запам'ятовування їх значень протягом визначеного періоду часу, як правило, польоту.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у розробці методу та засобів генерування псевдовипадкових опорних сигналів на основі кодових впорядкувань теоретико-числового базису рефлексно відображених функцій Радемахера в трактах АЦ перетворення вхідної інформації методом статистичних досліджень Монте-Карло [13-18]. Це дозволило здійснити перетворення в режимі реального часу та автоматичне інтегрування поточних відліків в регістрах чи пам'яті системи, знизити частоту сканування вхідного сигналу, усереднити похибку та підвищити достовірність результатів АЦ перетворення, знизити кошти впровадження та застосування АЦ перетворювачів.

### Аналіз методів і засобів АЦ перетворення та обґрунтування застосування АЦП Монте-Карло

В залежності від спектрально-смугових, техніко-економічних та технологічних вимог до засобів перетворення вхідної інформації використовуються різноманітні методи та архітектури АЦ перетворення [14-17, 19]. АЦ перетворювачі (АЦП) в загальному випадку розрізняють на декілька класів згідно точності перетворення, швидкодії, архітектурних та економічних характеристик. Кожен клас характеризується співвідношенням числа компараторів, тактів періоду АЦ перетворення та пристроїв вибірки-зберігання, за умови наявності таких. В літературних джерелах наведено різноманітні класифікації методів АЦ перетворення, однак найбільшого поширення набула класифікація, яка характеризує часове та алгоритмічне представлення процесу перетворення [14, 16]. Виходячи з цього, АЦП підрозділяються на три основні класи: послідовні, паралельні та комбіновані.

Послідовні АЦП (інтегруючі, послідовного наближення, слідкуючі, напруга-частота) при високій точності та розрядності вихідного коду перетворення мають низьку швидкодію, проте порівняно низькі кошти виготовлення [14, 15, 20-22]. Паралельні АЦП функціонують згідно принципу одночасного перетворення сигналу за допомогою паралельного набору компараторів, володіють найвищою швидкістю, енергоспоживанням, габаритами та є найдорожчими внаслідок розпаралелювання архітектури перетворювачів [23-25]. Комбіновані структури АЦП функціонують згідно принципу багатоступінчатих алгоритмів перетворення та дозволяють досягнути компромісного співвідношення швидкодії, ступеня розпаралелювання архітектури перетворювача та його вартості [28-32]. При розробці та виготовленні кристалів АЦП необхідно враховувати різноманітність елементів в їх складі, технологічні вимоги та вимоги щодо характеристик точності, температурної і часової стабільності, регулярності структури та наявності нелінійних елементів.

Із вище наведеного, основні тенденції розвитку методів та засобів АЦ перетворення полягають в розширенні функціональних можливостей, піднятті швидкодії, виробничої та експлуатаційної надійності, підвищенні регулярності архітектури, зменшенні габаритів та кількості виводів кристалу, зниженні енергоспоживання, зменшенні вартості серійного виробництва. Зі збільшенням числа компараторів, зростає швидкодія, яка зумовлює спектральні характеристики, проте зростають габарити пристрою та його

вартість. Збільшення кількості тактів перетворення знижує швидкодію, але дозволяє зменшити кількість компараторів, спростити структуру АЦП та знизити вартість виготовлення [15-17].

Застосування статистичного методу сканування Монте-Карло дозволяє розширити частотну смугу сигналів перетворення та реалізувати багатовимірне інтегрування за умови інваріантного архітектурного вирішення та апаратних і грошових затрат у порівнянні з інтегруючими АЦП, що зумовлює актуальність проведення досліджень у вказаному напрямку [18].

Аналізуючи розвиток методів та схемотехніки АЦП, спостерігається чітка спеціалізація АЦ інтегральних схем щодо задач застосування [20, 21, 24-27, 29, 31, 32]. Спостерігаються такі тенденції в розробці ефективних АЦП: напрямок АЦ процесорів (на основі дельта-сігма АЦП), комбінування багатокаскадних структур з гібридною технологією виготовлення інтегральних схем та перехід до нових кодових систем перетворення [30]. Проте широкою залишається область застосування традиційних АЦП з подвійним інтегруванням, які дозволяють забезпечити значний динамічний діапазон (більше 14 розрядів). Сигнали для інтегруючого перетворювача легко мультиплекуються, проте межею частоти перетворення є 10-60 відліків/с в залежності від розрядності вихідного коду перетворення. Найближчим часом не передбачається тенденцій щодо витіснення інтегруючих та багатокаскадних новими спеціалізованими дельта-сігма АЦП [14-16]. Користувачі точних дельта-сігма перетворювачів вимушені застосовувати АЦП індивідуально на кожному із каналів внаслідок значного часу встановлення вхідних фільтрів, коли інтегруючі, багатокаскадні та АЦП послідовного перетворення дозволяють здійснювати багатоканальне мультиплексування.

Застосування методів перетворення в традиційних кодових системах набуло певного рівня насичення та обмеження перспективи подальшого їх застосування, що в значній мірі зумовило необхідність розробки таких складних процедур високоточного перетворення як дельта-сігма, із плаваючою комою, багатокаскадних, яким характерна висока неоднорідність структури, що спричинило ускладнення інтегральної, модульної і гібридної технологій процесу виготовлення та подорожання виробництва АЦП. Перехід до нових числових базисів та кодових систем дозволяє покращити ряд техніко-економічних показників [17, 18, 20, 21]. Результати дослідження визначили перспективним застосування надлишкових кодів в засобах АЦП, а також використання нових методів формування кодових упорядкувань АЦ перетворення [5, 29, 31].

Автором розвивається новий напрямок в методах та засобах АЦ перетворення в класі інтегруючих АЦП для вирішення задач статистичного аналізу інтегральних характеристик сигналів на основі застосування методу Монте-Карло [18]. На відміну від наведених в літературних джерелах методів [14-16] вперше вводиться теоретико-числовий базис рефлексно відображених функцій Радемахера, що є основою математичного моделювання відліків із рівномірним законом розподілу, на підставі якого розроблено ряд високоякісних генераторів псевдовипадкових величин в складі АЦП Монте-Карло. Вперше реалізована можливість і розроблено метод багатоквadrантного перетворення сигналів довільної форми з векторним перемноженням та розділеною індикацією "+" і "-" складових, а також як кожного із окремих параметрів, так і проміжних значень їх векторного добутку. Розроблено ряд архітектурних рішень АЦ перетворення одно- та двополярних сигналів, вимірювання із дво- та чотириквadrантним статистичним перемноженням двох та більше некорельованих сигналів, графічних одно- та багатоканальних АЦП.

### Метод статистичного перетворення Монте-Карло

При реалізації системних функцій інфотехнологій часто виникає необхідність визначення одно- та багатовимірних інтегралів інформаційних параметрів. Для вирішення задач такого типу в техніці перетворення форми інформації застосовано метод статистичних досліджень Монте-Карло [14, 18], збіжність якого не залежить від кратності інтегралу, а кількість операцій зростає лінійно кратності, коли в звичайних методах інтегрування кількість операцій зростає в показниковій залежності. Похибка перетворення залежить від числа випробувань. Метод Монте-Карло володіє одними з кращих показниками збіжності порівняно із відомими методами та ґрунтується на інтерпретації результату вимірювання як імовірності появи певного роду подій модельованого псевдовипадкового процесу. Зв'язок між математичним очікуванням вимірюваного та модельованого процесів ґрунтується на таких положеннях.

Нехай інформаційний процес  $X$  має невідому функцію розподілу  $\Phi(x)$ , яка визначена на інтервалі  $[0, 1]$  і рівна нулю  $\Phi(x)=0$  при  $x < 0$ . Значення вимірюваної величини є нормованими на інтервалі визначення  $[0, 1]$ . Закладено, що модельований процес  $Y$  має відому функцію розподілу  $G(y)$ , визначену також на інтервалі  $[0, 1]$ . Розглянемо імовірність того, що  $Y < x$  на інтервалі  $0 \leq x \leq 1$ .

Для дискретних величин

$$p\{Y < x\} = G(x).$$

Якщо  $Y$  має рівномірний закон розподілу, то

$$p\{Y < x\} = M[X].$$

Ця залежність визначає можливість обчислення математичного очікування  $M[X]$  досліджуваного процесу за частотою виникнення події  $P = Y < x$ / внаслідок оцінки значної серії незалежних послідовних випробувань.

Реалізація наведеного математичного співвідношення полягає в проведенні серії статистично незалежних досліджень із накопиченням результатів, причому додатний результат полягає в тому, що досліджувана функція є більшою за значення випадково генерованого відліку, а від'ємний – величина випадково генерованого відліку є більшою за поточне значення досліджуваної функції  $X$ . Характеристичною для методу Монте-Карло є оцінка невідомого математичного очікування деякої випадкової величини за значенням визначеної суми відліків, що і характеризує значення інтегралу досліджуваної функції в області визначення за результатами проведених досліджень на підставі відомого рівномірного імовірнісного розподілу. Для реалізації методу Монте-Карло необхідним є застосування генераторів випадкових значень опорних сигналів із різноманітними законами розподілу, причому основну роль в їхньому складі відіграють генератори із рівномірним розподілом [18].

### Основи АЦ перетворення Монте-Карло

В цифровій кодовій послідовності з псевдовипадковим розподілом  $n$ -розрядні кодові фрагменти володіють псевдовипадковим характером розподілу, тому їхнє аналогове представлення теж відображає псевдовипадковий характер імовірнісного розподілу на площині сканування. АЦП реалізує математичну процедуру визначення значення математичного очікування вимірюваного сигналу на періоді розгортки опорного псевдовипадкового сигналу згідно залежності

$$M\{U_x(t)\} = n/N = p = \sum_0^l U_x(t) \Delta t,$$

де  $n$  – кількість додатних результатів імовірнісного дослідження в серії із  $N$  дослідів;

$p$  – імовірнісна міра кількісної характеристики процесу  $U_x(t)$ .

На основі однополярного АЦП перейдемо до реалізації двоквадрантних перетворювачів змінних сигналів.

### Метод та реалізація двоквадрантного аналого-цифрового перетворення Монте-Карло

У відомих засобах перетворення змінних величин застосовують різноманітні методи їх випрямлення у відповідну функцію одного знаку із подальшим однополярним перетворенням, або ж швидке АЦ перетворення із частотою дискретизації, значно вищою верхньої спектральної складової вхідного сигналу перетворення [14 – 16]. Проте, аналогові засоби попереднього перетворення форми інформації вносять значні апаратні спотворення, що знижує точність та достовірність результату перетворення. Метод АЦ перетворення Монте-Карло в класі інтегруючих АЦП дозволив вперше здійснити безпосереднє перетворення інтегральних характеристик двополярних сигналів довільної форми та їх асиметрії в значеннях "+" та "-" – складових. Вперше реалізована можливість розділеного і сумарного вимірювання та індикації обох знакових складових змінного сигналу. На рис. 1 наведено структурну схему двоквадрантного АЦП Монте-Карло, а на рис. 2 – часові діаграми його функціонування.

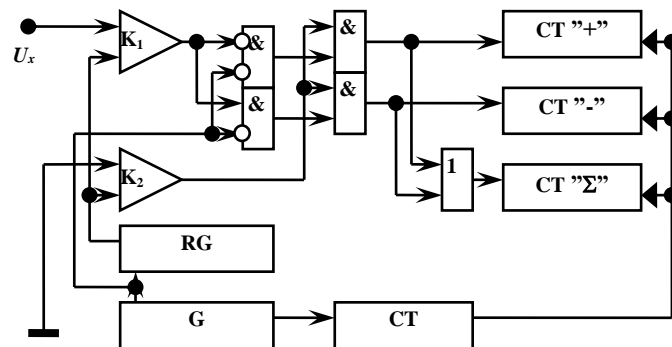


Рисунок 1 – Структурна схема двоквадрантного АЦП Монте-Карло

На перший вхід компаратора  $K1$  (рис. 1) подається нормоване значення вимірюваного двополярного сигналу  $U_x$ , яке порівнюється із дискретними відліками аналогової псевдовипадкової розгортки сигналу сканування  $U_{on}$  (рис. 2 а), 3 а)) із виходу генератора псевдовипадкового сигналу  $RG$ . Цифро-аналоговий перетворювач в складі генератора  $RG$  ввімкнений в режимі формування двополярної симетричної відносно аналогового нуля розгортки сканування в діапазоні  $\pm U_{x \max}$  (рис. 2, 3). Вихідні повідомлення із виходу компаратора  $K1$  стробуються логічним елементом  $\&$  імпульсами тактування з виходу генератора  $G$

та детектуються цифровим нуль-детектором, на другі входи якого подається сигнал із виходу компаратора K2, що виконує функцію аналогового нуль-детектора. Із виходів цифрового нуль-детектора число-імпульсні послідовності, що є функцією значення параметру перетворення, подаються на розділене по "+" і "-" складових та загальне сумування лічильниками СТ"+", СТ"- і СТ"Σ". Показники значення суми імпульсів кожного із лічильників характеризують відповідно значення інтегралів "+"-складової, "-"-складової та сумарного значення (рис. 2 б), 3 б)).

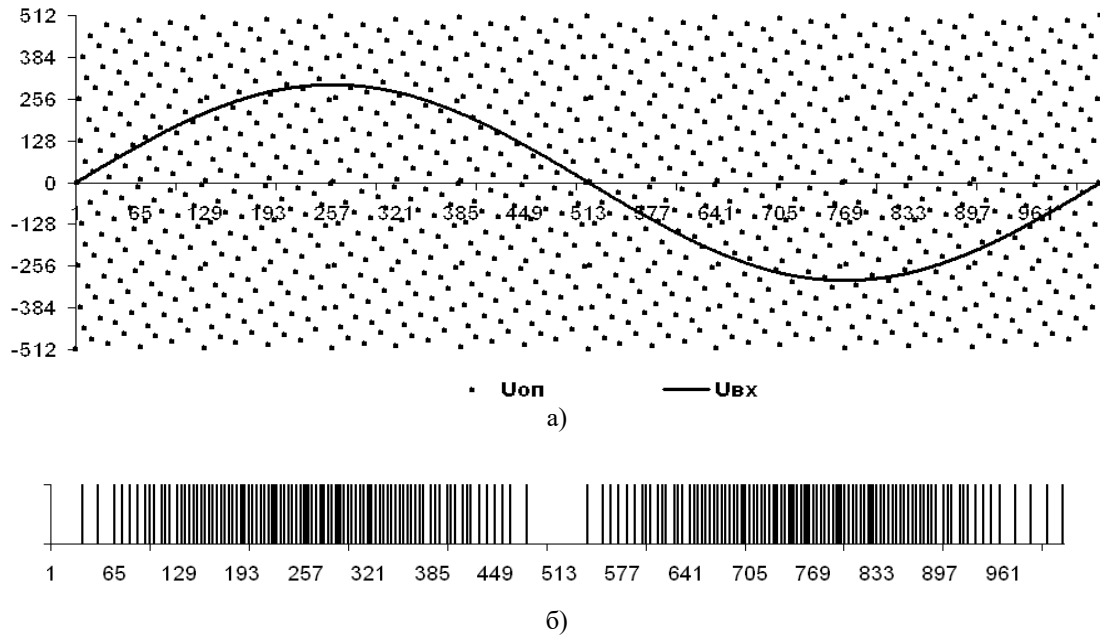


Рисунок 2 – Часові діаграми АЦ перетворення симетричного відносно 0 змінного сигналу

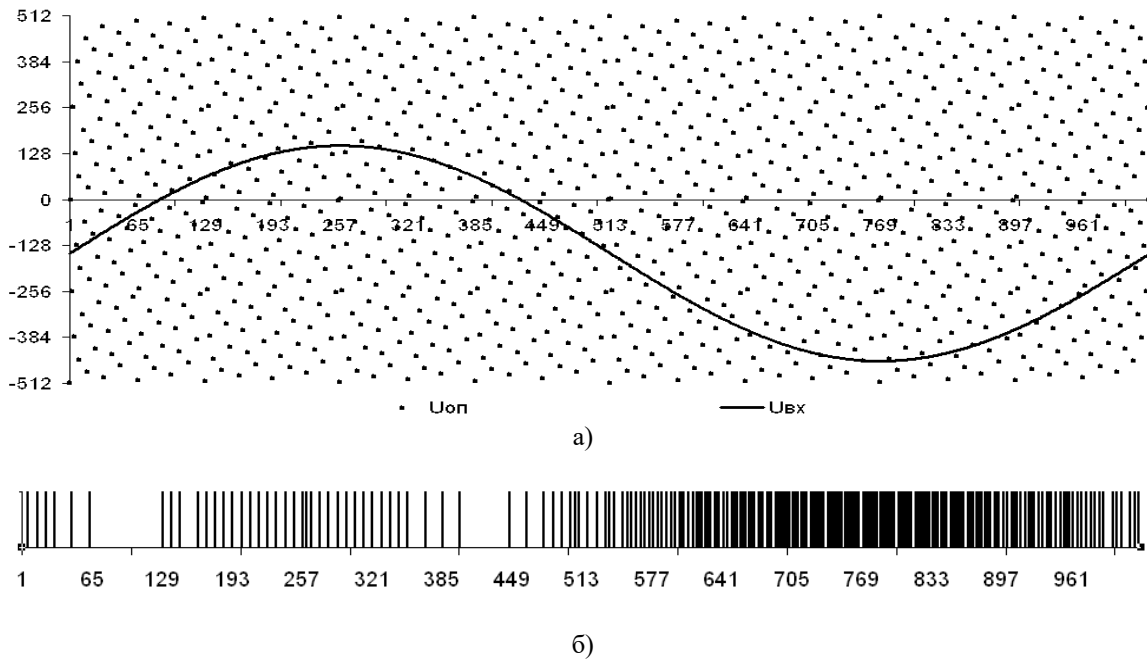


Рисунок 3 – Часові діаграми АЦ перетворення асиметричного відносно 0 змінного сигналу

Із розширенням кількості відліків на періоді дослідження точність АЦП підвищується внаслідок реалізації статистичного усереднення.

### Висновки

Досліджено концепції розвитку та проблематику застосування перспективних методів АЦ перетворення, в результаті чого визначено шляхи покращення техніко-економічних показників АЦ перетворювачів. Встановлено, що за останні роки техніка АЦ перетворення під впливом потреб споживачів дозволила значно підвищити рівень технічних параметрів в основному за рахунок технологічних досягнень. Тенденції подальшого розвитку ринку АЦП полягають у скороченні числа інтегральних перетворювачів загального призначення, а переважний розвиток отримують спеціалізовані перетворювачі, орієнтовані на специфіку джерел повідомлень. Досліджено і обґрунтовано ефективність застосуванням методу Монте-Карло на базі генераторів псевдовипадкових рефлексивно відображених послідовностей Радемахера із лінійним імовірнісним розподілом аналогового подання скануючих сигналів, що дозволило розробити методи багатоквadrантного перетворення та структури АЦП двополярних сигналів довільної форми, із векторним перемноженням сигналів, багатоканального та "графічного" перетворення.

### References

- [1] E. H. Currie, *Mixed-Signal Embedded Systems Design. A Hands-on Guide to the Cypress PSoC*. Springer Cham. Published: 2021, 860 p. 335 b/w illustrations, 182 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70312-7>. Hardcover ISBN 978-3-030-70311-0, Softcover ISBN 978-3-030-70314-1, eBook ISBN 978-3-030-70312-7.
- [2] J. Ganssle, T. Noergaard and more, *Embedded Hardware: Know It All*. Elsevier, 2007. eBook ISBN: 9780080560748.
- [3] H. Bernstein, *Measuring Electronics and Sensors. Basics of Measurement Technology, Sensors, Analog and Digital Signal Processing*. Springer Wiesbaden, Published: 2021, 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35067-3>. Softcover ISBN 978-3-658-35066-6, eBook ISBN 978-3-658-35067-3.
- [4] V. L. N. Komanapalli, N. Sivakumaran, S. Hampannavar, Eds, "Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control". *Select Proceedings of i-CASIC 2020*. Springer Singapore. Published: 2021, 3329 p., 588 b/w illustrations, 1554 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8221-9>. Hardcover ISBN 978-981-15-8220-2, Softcover ISBN 978-981-15-8223-3, eBook ISBN 978-981-15-8221-9, ISSN 1876-1100, E-ISSN 1876-1119.
- [5] O. Azarov, Y. Heneralnytskyi, N. Rybko, "Multi-channel digital-analog system based on current-current converters". *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. Politechnika Lubelska. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. vol.10, nr 4. pp. 43-46.
- [6] S. F. Barrett, "Analog to Digital Conversion (ADC)", In *Arduino Microcontroller Processing for Everyone!*. Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems. Springer, Cham, 2013, pp 163-215. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-79864-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-79864-1_5). Print ISBN 978-3-031-79863-4, Online ISBN 978-3-031-79864-1.
- [7] S. Motahhir, B. Bossoufi Editors, "Digital Technologies and Applications". *Proceedings of ICDTA 21*, Fez, Morocco. Springer Cham. Published: 2021, 1836 p. 295 b/w illustrations, 840 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2>. Softcover ISBN 978-3-030-73881-5, eBook ISBN 978-3-030-73882-2, Series ISSN 2367-3370, Series E-ISSN 2367-3389.
- [8] L. Tan, J. Jiang, *Digital Signal Processing. Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2018, 902 p. eBook ISBN: 9780128150726, Paperback ISBN: 9780128150719.
- [9] E. I. Chumachenko, L. B. Petryshyn, V. V. Konchinsky, "Traffic sign detection and recognition using single shot multibox detectorissn". 1990-5548. *Electronics and Control Systems*. 2021, nr 1(67): pp. 26-32.
- [10] J. Luecke, *Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications*. Elsevier, 2004. Paperback 978-0-7506-7810-0, eBook 978-0-08-047581-3.
- [11] M. Wolfc, *Embedded System Interfacing. Design for the Internet-of-Things (IoT) and Cyber-Physical Systems (CPS)*. Elsevier Inc. 2019. Paperback ISBN: 9780128174029, eBook ISBN: 9780128174036, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00203-0>.
- [12] L. Petryshyn, M. Petryshyn, "Error protected data transmission on the recursive encryption base", in: *2019 IEEE 5th international conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*: October 22–24, 2019, Kyiv, Ukraine: proceedings / IEEE Ukraine Section SP/AES Societies Joint Chapter, National Aviation University: IEEE, cop. 2019, pp. 282–285. e-ISBN: 978-1-7281-2592-3.
- [13] A. Agarwal, J. Lang, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*. 2005. Paperback 978-1-55860-735-4, eBook 978-0-08-050681-4.
- [14] M. J. M. Pelgrom, *Analog-to-Digital Conversion*. Springer Cham. 4 edition. Published: 2022, 1011 p. 328 b/w illustrations, 454 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90808-9>. Hardcover ISBN 978-3-030-90807-2, Softcover ISBN 978-3-030-90810-2, eBook ISBN 978-3-030-90808-9.

- [15] D. Sheingold, Ed., *Analog-Digital Conversion Handbook*. Analog Devices/Prentice-Hall, 1986. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/education/education-library/analog-digital-conversion-1986.html> Accessed on: March 07, 2023.
- [16] W. Kester, Ed., *The Data Conversion Handbook*. Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0. Also published as *Analog-Digital Conversion*, Analog Devices, Inc. 2004, ISBN 0-916550-27-3. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/education/education-library/data-conversion-handbook.html>. Accessed on: March 07, 2023.
- [17] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Second Edition, California Technical Publishing, 1999. ISBN 0-9660176-7-6, ISBN 0-9660176-4-1, ISBN 0-9660176-6-8. [Online]. Available: [https://www.analog.com/en/education/education-library/scientist\\_engineers\\_guide.html](https://www.analog.com/en/education/education-library/scientist_engineers_guide.html). Accessed on: March 07, 2023.
- [18] L. Petryshyn, "Monte Carlo Multi-Quadrant Analog-to-Digital Conversion of Parameters of Unmanned Aerial Vehicles". *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)* DOI: 10.1109/APUAVD53804.2021. 19-21 Oct. 2021, pp. 139-143.
- [19] Y. Zheng, Y. Zhao, N. Zhou, H. Wang, D. Jiang, "A short review of some analog-to-digital converters resolution enhancement methods". *Measurement*, vol. 180, August 2021, 109554. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109554>.
- [20] M. Deghat, P. Karimaghaee, "A new method for integrating analog to digital conversion based on error reduction". *Measurement*. vol. 40, iss. 9–10, 2007, pp. 919-927. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.10.013>.
- [21] N. Guangshan, L. Cong, Z. Jianwei, L. Xuetao, L. Xiangdong, "Research progress of time-interleaved analog-to-digital converters". *Integration*, vol. 81, November 2021, pp. 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.08.007>.
- [22] B. Haraoubia. *Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters: in Non-Linear Electronics 2: Flip-Flops, ADC, DAC and PLL*. Elsevier Inc. 2019, pp. 99-190. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-301-1.50002-7>.
- [23] L. Kumre, N. V. Ramesh, "Design and Implementation of Flash Analog to digital Converter": in *Materials Today: Proceedings*. vol. 5, iss. 1, part 1, 2018, pp. 1104-1113. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.189>.
- [24] E. G. Clara, Z. H. Wilkins, "A 16-bit 10Gbps current steering RF DAC in 65 nm CMOS achieving 65dBc ACLR multi-carrier performance at 4.5 GHz Fout". In: *Symposium on VLSI circuits digest of technical papers*, 2015, pp. 166–167.
- [25] A. T. Ramkaj, M. J. M. Pelgrom, M. S. J. Steyaert, F. Tavernier, *Multi-Gigahertz Nyquist Analog-to-Digital Converters. Architecture and Circuit Innovations in Deep-Scaled CMOS and FinFET Technologist*. Springer Cham. Published: 2023, 269 p. 36 b/w illustrations, 131 illustrations in colour. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22709-7> Hardcover ISBN 978-3-031-22708-0, Softcover ISBN 978-3-031-22711-0, eBook ISBN 978-3-031-22709-7, ISSN 1872-082X, E-ISSN 2197-1854.
- [26] M. Alavi, J. Mehta, R. Staszewski, *Radio-Frequency Digital-to-Analog Converters*. Elsevier. 2016. eBook 978-0-12-802503-1, Hardcover 978-0-12-802263-4.
- [27] D. Li, X. Zhao, S. Liu, M. Liu, R. Ding, Y. Liang, Z. Zhu, "Radio frequency analog-to-digital converters: Systems and circuits review". *Microelectronics Journal*, vol. 119, 2022, 105331. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105331>.
- [28] C. C. Lee, M. P. Flynn, "A SAR-assisted two-stage pipeline ADC". *IEEE J Solid-State Circuits* 46, 2011, pp. 859–869.
- [29] O. Azarov, L. Krupelnitskyi, H. Rakytyanska, J. Fesl, "Reconstruction of Acoustic Surfaces Incomplete Data as an Identification Problem Based on Fuzzy Relations". RWTH Aachen University. 2022. *CEUR Workshop Proceedings*: pp. 208–226.
- [30] C. F. Hsieh, T. H. Tsai, C. S. Chen, Y. H. Hsieh, "Implementation of a Delta-Sigma Analog-to-Digital Converter". In: Juang, J. (ed.) *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Technologies and Engineering Systems (ICITES2014)*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 345. Springer, Cham. 2016, pp. 257-262. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17314-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17314-6_34). Print ISBN 978-3-319-17313-9, Online ISBN 978-3-319-17314-6.
- [31] O. Azarov, L. Krupelnitskyi, H. Rakytyanska, "Sound field reconstruction from incomplete data by solving fuzzy relational equations". – Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making: *2020 International Scientific Conference "Intellectual Systems of Decision-making and Problems of Computational Intelligence"*, Springer International Publishing, 2021, pp. 547-566.
- [32] A. Pourahmad, R. Dehghani, S. A. A. Mehr, R. Lotfi, "Versatile DAC-less successive approximation ADC architecture for medium speed data acquisition". *Microelectronics Journal*, vol. 129, November 2022, 105585. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2022.105585>.

Стаття надійшла: 22.02.2023.

**Відомості про автора**

**Петришин Любомир Богданович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління підприємством, AGH науково-технологічний університет, Краків, Польща.

L. B. Petryshyn

**TWO-QUADRANT ANALOG-DIGITAL CONVERSION OF  
MONTE CARLO**

AGH University of Science and Technology, Cracow, Poland