

## ПРИСТРОЇ З ПРОГРАМОВАНИМИ ЦАП І АЦП ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ

*Троцишина Н.І., Троцишин І.В.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
vottp.tiv@gmail.com*

## УСТРОЙСТВА С ПРОГРАММИРУЕМЫМИ ЦАП И АЦП ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ

*Троцишина Н.И., Троцишин И.В.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
vottp.tiv@gmail.com*

## DEVICES WITH PROGRAMMABLE DAC AND ADC FOR PROCESSING RADIO SIGNALS

*Trotsyshyna N.I., Trotsyshyn I.V.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznethna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
vottp.tiv@gmail.com*

**Анотація.** Розглянуто можливості і надано результати практичних досліджень стосовно можливостей використання базового елемента ЦАП і АЦП на основі атенюатора-подільника Троцишина як елемента нового типу - з програмованими параметрами характеристики перетворення. Надано наглядні характеристики ЦАП і АЦП, отримані шляхом розрахунків, симуляційним моделюванням та натурним експериментом, багаторазово доведено наявність значно більшого числа квантових рівнів перетворення в АПТ, ніж у такої самої розрядності класичного подільника Кельвіна. Запропоновані новітня методологія і прості та досить ефективні засоби для створення нового класу ЦАП і АЦП із можливістю програмування характеристики перетворення, в уже виготовлених зразках мікросхем, які крім АПТ повинні мати додатково поле програмування виду характеристики.

**Ключові слова:** програмовані ЦАП і АЦП, атенюатор-подільник Троцишина (АПТ), подільник Кельвіна, програмування характеристики перетворення в процесі експлуатації.

**Аннотация.** Рассмотрены возможности и представлены результаты практических исследований относительно возможностей использования базового элемента ЦАП и АЦП на основе аттенюатора-делителя Троцишина как элемента нового типа – с программируемыми параметрами характеристики преобразования. Приведены наглядные характеристики ЦАП и АЦП, полученные путем расчетов, симуляционным моделированием и натурным экспериментом, многократно доказано наличие значительно большего числа квантовых уровней преобразования в АДТ, чем в такой же разрядности классического делителя Кельвина. Предложены новая методология и простые и достаточно эффективные средства для создания нового класса ЦАП и АЦП с возможностью программирования характеристики преобразования в уже изготовленных образцах микросхем, которые кроме АПТ должны иметь дополнительно поле программирования вида характеристики.

**Ключевые слова:** программируемые ЦАП и АЦП, аттенюатор-делитель Троцишина (АДТ), делитель Кельвина, программирование характеристики преобразования в процессе эксплуатации.

**Abstract.** The possibilities and presents the results of case studies regarding the possibilities of using a basic element of DAC and ADC based attenuator-divider Trotsyshyna as part of a new type - a programmable parameters conversion characteristics. Powered clearly DAC and ADC characteristics obtained by calculations, modeling and stimulation based experiments repeatedly proved the presence of a much larger number of quantum levels in ADT transformation than in the same bit of classical Kelvin divider. A novel methodology and simple and very effective means of creating a new class of ADCs and DACs with

programmable characteristics conversion, the samples are produced chips that apart from APP should have an additional right type of programming characteristics.

**Key words:** programmable DAC and ADC, attenuator-divider Trotsyshyna (ADT) Kelvin divider, programming conversion characteristics during operation.

Існуючі ЦАП і АЦП наразі є невід'ємною частиною сучасної радіотехнічної апаратури і майже 90% всіх оброблень і перетворень радіосигналів безпосередньо використовують названі види перетворень. Враховуючи різноманітні вимоги до параметрів точності та швидкодії для розв'язання поставлених задач, величезною є сучасна номенклатура ЦАП і АЦП, які випускаються багатьма компаніями, типовим прикладом можна вважати Analog Devices, LTC, Samsung та десятки інших [1-5].

Принциповим обмеженням усіх класичних ЦАП і АЦП є фіксована (встановлена при виробництві мікросхем) кількість рівнів перетворення (не враховуючи зменшення кількості розрядів). У той самий час не має жодного приладу, який би мав збільшення розрядності, тим більш мав можливість програмувати характеристику перетворення, в уже виготовленому зразку мікросхеми.

З появою квантової теорії вимірювального перетворення [1] і його прототипом у вигляді атенюатора-подільника Троцишина (АПТ) [2], де вказані параметри збільшення кількості квантових рівнів і програмування, характеристики перетворення стали можливими.

Враховуючи багаторазові теоретичні та комп'ютерні дослідження, питання елементарних досліджень ЦАП на основі ланцюжка однакових резисторів, включених у вимірювальну схему із комутації батареї живлення і вольтметра, можливо однозначно показати як отримати «квантові точки шкали», які виходять за значення шкали Кельвіна.

Доведення на практичних дослідах із ланцюжком резисторів однакового номіналу, увімкнених за схемою АПТ, однозначно покаже не лише наявність збільшення квантових точок шкали, але й наявність можливості її програмувати, що неможливо у жодному із існуючих ЦАП і АЦП. Підтвердження на практиці можливості збільшення точок шкали перетворення подільника Кельвіна при його ввімкненні за схемою АПТ, а також виявлену можливість програмування характеристики перетворення ЦАП і АЦП, побудованих на основі атенюаторів-подільників Троцишина.

**Метою роботи** є дослідження точності вимірювання та роздільної здатності характеристики перетворення нових типів ЦАП і АЦП, побудованих на основі атенюаторів-подільників Троцишина, а також можливості програмування характеристики перетворення.

Класичні методи та засоби вимірювального перетворення амплітудних параметрів базуються на використанні так званої двійкової вимірювальної шкали перетворення [1]:

$$n_i = \frac{i}{2^N}, i \in (0 \dots 2^N - 1), \quad (1)$$

де  $N$  – розрядність двійкового коду перетворення.

Як уже зазначалось [1-5], класична двійкова шкала вимірювального перетворення (1) є лише частковим випадком більш потужної шкали відношень [2], яка на практиці реалізується за принципом коінциденції [1-5], і рівняння квантових значень шкали можливо записати як:

$$n_i = \frac{A_i}{B_j}, i \in (0 \dots Q), j \in (1 \dots Q), \quad (2)$$

де  $Q$  – ціле натуральне число.

Цілком очевидно, що якщо  $i \leq j$  – отримаємо так звану дробову квантову шкалу значень у діапазоні від 0,0000 і до 1,000000, якщо ж  $i \geq j$  – буде цілочислова дробово-раціональна шкала в діапазоні 1,0000 і до  $Q$ .

Тому, якщо у (2) підставити  $A_i = i, B_j = 2^N$ , отримаємо вже відому (1).

У той самий час питання закономірностей утворення квантованих значень вимірювальної шкали за методом коінциденції потребують більш детального розгляду її поведінки, динаміки збільшення кількості поділок (додатково до класичної), а також дослідження вторинних характеристик, таких як відхилення від лінійного закону, оптимального вибору кількості ступенів квантування будуть розглянуті далі, а також надано порівняльні характеристики.

**Принцип та модель утворення вимірювальної шкали під час цифрового вимірювального перетворення.** Табличний метод формування вимірювальної шкали перетворення для випадку методу коінциденції можна розглядати в динаміці формування шляхом збільшення або зменшення кількості поділок шкали виміру (горизонтальна шкала) та вхідного подільника (вертикальна шкала), як для випадку  $N_{on} = N_x$  у діапазоні від 8 до 2, так і для шкал від 16 до 9 поділок. (рис. 1 та 2).

	8	7	6	5	4	3	2	1
8	1,000	0,875	0,750	0,625	0,500	0,375	0,250	0,125
7	1,143	1,000	0,857	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143
6	1,333	1,167	1,000	0,833	0,667	0,500	0,333	0,167
5	1,600	1,400	1,200	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200
4	2,000	1,750	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250
3	2,667	2,333	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333
2	4,000	3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500
1	8,000	7,000	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000

	7	6	5	4	3	2	1
7	1,000	0,857	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143
6	1,167	1,000	0,833	0,667	0,500	0,333	0,167
5	1,400	1,200	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200
4	1,750	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250
3	2,333	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333
2	3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500
1	7,000	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000

	6	5	4	3	2	1
6	1,000	0,833	0,667	0,500	0,333	0,167
5	1,200	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200
4	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250
3	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333
2	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500
1	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000

Рисунок 1 – Шкали 8, 7, 6

	5	4	3	2	1
5	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200
4	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250
3	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333
2	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500
1	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000

	4	3	2	1
4	1,000	0,750	0,500	0,250
3	1,333	1,000	0,667	0,333
2	2,000	1,500	1,000	0,500
1	4,000	3,000	2,000	1,000

	3	2	1
3	1,000	0,667	0,333
2	1,500	1,000	0,500
1	3,000	2,000	1,000

	2	1
2	1	0,5
1	2	1

Рисунок 2 – Шкали 5, 4, 3, 2

Збільшення поділок у діапазоні від 9 до 16 не показано, а на рис. 3 показано характерний випадок 16 x 16.

Шкали вимірювального перетворення для характерних 8 x 8 і 16 x 16, з урахуванням надлишковості всіх можливих точок перетворення, тому для випадку ЦАП (АЦП), коли визначним є мінімізація коефіцієнта ділення сигналів (покращення співвідношення сигнал/шум), як приклад розташування значень саме шкали 8-коінциденції буде мати вигляд рис. 4.

	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
16	1,000	0,938	0,875	0,812	0,750	0,688	0,625	0,562	0,500	0,438	0,375	0,312	0,250	0,188	0,125	0,062
15	1,067	1,000	0,933	0,867	0,800	0,733	0,667	0,600	0,533	0,467	0,400	0,333	0,267	0,200	0,133	0,067
14	1,143	1,071	1,000	0,929	0,857	0,786	0,714	0,643	0,571	0,500	0,429	0,357	0,286	0,214	0,143	0,071
13	1,231	1,154	1,077	1,000	0,923	0,846	0,769	0,692	0,615	0,538	0,462	0,385	0,308	0,231	0,154	0,077
12	1,333	1,250	1,167	1,083	1,000	0,917	0,833	0,750	0,667	0,583	0,500	0,417	0,333	0,250	0,167	0,083
11	1,455	1,364	1,273	1,182	1,091	1,000	0,909	0,818	0,727	0,636	0,545	0,455	0,364	0,273	0,182	0,091
10	1,600	1,500	1,400	1,300	1,200	1,100	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500	0,400	0,300	0,200	0,100
9	1,778	1,667	1,556	1,444	1,333	1,222	1,111	1,000	0,889	0,778	0,667	0,556	0,444	0,333	0,222	0,111
8	2,000	1,875	1,750	1,625	1,500	1,375	1,250	1,125	1,000	0,875	0,750	0,625	0,500	0,375	0,250	0,125
7	2,286	2,143	2,000	1,857	1,714	1,571	1,429	1,286	1,143	1,000	0,857	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143
6	2,667	2,500	2,333	2,167	2,000	1,833	1,667	1,500	1,333	1,167	1,000	0,833	0,667	0,500	0,333	0,167
5	3,200	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200
4	4,000	3,750	3,500	3,250	3,000	2,750	2,500	2,250	2,000	1,750	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250
3	5,333	5,000	4,667	4,333	4,000	3,667	3,333	3,000	2,667	2,333	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333
2	8,000	7,500	7,000	6,500	6,000	5,500	5,000	4,500	4,000	3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500
1	16,000	15,000	14,000	13,000	12,000	11,000	10,000	9,000	8,000	7,000	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000

Рисунок 3 – Матриця значень шкали коінциденції 16 x 16.

	8	7	6	5	4	3	2	1	
<b>22</b>	1,000	0,875	0,750	0,625	0,500	0,375	0,250	0,125	
1,143		1,000	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	
1,333		1,167	1,000	<b>19</b>	<b>15</b>	0,500	<b>7</b>	<b>3</b>	
1,600		1,400	1,200	1,000	<b>18</b>	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	
2,000		1,750	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250	
2,667		2,333	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333	<b>П О В Т О Р И</b>
4,000		3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500	
8,000		7,000	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000	
						<b>ПОВТОРИ</b>			

Рисунок 4 – Результуюча шкала вимірювального перетворення для 8 x 8

Очевидним є отримання 22 значень шкали коінциденції замість 8 у класичній двійковій. Закономірність послідовності значень та їх розрахункові значення надано у табл. 1.

Таблиця 1 – Точки шкали коінциденції для 8

№ точки шкали	Числове значення (квантове) шкали коінциденції	Номер поділки виміру	Номер поділки подільника	Числовий код квантової точки шкали
1	0.1250000000000000	A= 1	B= 8	N=57
2	0.1428571428571428	A= 1	B= 7	N=49
3	0.1666666666666667	A= 1	B= 6	N=41
4	0.2000000000000000	A= 1	B= 5	N=33
5	0.2500000000000000	A= 1	B= 4	N=25
6	0.2857142857142857	A= 2	B= 7	N=50
7	0.3333333333333333	A= 1	B= 3	N=17
8	0.3750000000000000	A= 3	B= 8	N=59
9	0.4000000000000000	A= 2	B= 5	N=34
10	0.4285714285714285	A= 3	B= 7	N=51
11	0.5000000000000000	A= 1	B= 2	N=9
12	0.5714285714285714	A= 4	B= 7	N=52
13	0.6000000000000000	A= 3	B= 5	N=35
14	0.6250000000000000	A= 5	B= 8	N=61
15	0.6666666666666666	A= 2	B= 3	N=18
16	0.7142857142857143	A= 5	B= 7	N=53
17	0.7500000000000000	A= 3	B= 4	N=27
18	0.8000000000000000	A= 4	B= 5	N=36
19	0.8333333333333334	A= 5	B= 6	N=45
20	0.8571428571428571	A= 6	B= 7	N=54
21	0.8750000000000000	A= 7	B= 8	N=63
22	1.0000000000000000	A= 1	B= 1	N=1
	1.1428571428571428	A= 8	B= 7	N=56
	1.1666666666666667	A= 7	B= 6	N=47
	1.2000000000000000	A= 6	B= 5	N=38
	1.2500000000000000	A= 5	B= 4	N=29
	1.3333333333333333	A= 4	B= 3	N=20
	1.3999999999999999	A= 7	B= 5	N=39
	1.5000000000000000	A= 3	B= 2	N=11
	1.6000000000000001	A= 8	B= 5	N=40
	1.6666666666666667	A= 5	B= 3	N=21
	1.7500000000000000	A= 7	B= 4	N=31
	2.0000000000000000	A= 2	B= 1	N=2
	2.3333333333333335	A= 7	B= 3	N=23
	2.5000000000000000	A= 5	B= 2	N=13
	2.6666666666666665	A= 8	B= 3	N=24
	8.0000000000000000	A= 3	B= 1	N=3
	8.5000000000000000	A= 7	B= 2	N=15
	4.0000000000000000	A= 4	B= 1	N=4
	5.0000000000000000	A= 5	B= 1	N=5
	6.0000000000000000	A= 6	B= 1	N=6
	7.0000000000000000	A= 7	B= 1	N=7
	8.0000000000000000	A= 8	B= 1	N=8

Для випадку 16 x 16 кількість квантованих точок шкали коінциденції збільшується із 16 для класичної двійкової, до 80 (рис. 5).

Очевидним є зона повторів значень, які характерні надлишковій шкалі коінциденції (зона 1-8 x 1-8), у нижньому куту матриці.

Верхній ряд значень утворює значення які використовуються у класичній двійковій системі із кількістю 16, у той самий час верхня частина, обмежена діагональною 1-1-1-1-1 і зоною повторів, дає додаткові значення шкали коінциденції, а їх загальна кількість разом із класичною двійковою шкалою, яка є як складова квантової шкали коінциденції, дає 80 квантованих значень у діапазоні дробових значень, менших за 1,000000.

	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
16	1,000	0,938	0,875	0,812	0,750	0,688	0,625	0,562	0,500	0,438	0,375	0,312	0,250	0,188	0,125	0,062	
15	1,067	1,000	0,933	0,867	0,800	0,733	0,667	0,600	0,533	0,467	0,400	0,333	0,267	0,200	0,133	0,067	
14	1,143	1,071	1,000	0,929	0,857	0,786	0,714	0,643	0,571	0,500	0,429	0,357	0,286	0,214	0,143	0,071	
13	1,231	1,154	1,077	1,000	0,923	0,846	0,769	0,692	0,615	0,538	0,462	0,385	0,308	0,231	0,154	0,077	
12	1,333	1,250	1,167	1,083	1,000	0,917	0,833	0,750	0,667	0,583	0,500	0,417	0,333	0,250	0,167	0,083	
11	1,455	1,364	1,273	1,182	1,091	1,000	0,909	0,818	0,727	0,636	0,545	0,455	0,364	0,273	0,182	0,091	
10	1,600	1,500	1,400	1,300	1,200	1,100	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500	0,400	0,300	0,200	0,100	
9	1,778	1,667	1,556	1,444	1,333	1,222	1,111	1,000	0,889	0,778	0,667	0,556	0,444	0,333	0,222	0,111	
8	2,000	1,875	1,750	1,625	1,500	1,375	1,250	1,125	1,000	0,875	0,750	0,625	0,500	0,375	0,250	0,125	8 П
7	2,286	2,143	2,000	1,857	1,714	1,571	1,429	1,286	1,143	1,000	0,857	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143	7 о
6	2,667	2,500	2,333	2,167	2,000	1,833	1,667	1,500	1,333	1,167	1,000	0,833	0,667	0,500	0,333	0,167	6 в
5	3,200	3,000	2,800	2,600	2,400	2,200	2,000	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000	0,800	0,600	0,400	0,200	5 г
4	4,000	3,750	3,500	3,250	3,000	2,750	2,500	2,250	2,000	1,750	1,500	1,250	1,000	0,750	0,500	0,250	4 о
3	5,333	5,000	4,667	4,333	4,000	3,667	3,333	3,000	2,667	2,333	2,000	1,667	1,333	1,000	0,667	0,333	3 р
2	8,000	7,500	7,000	6,500	6,000	5,500	5,000	4,500	4,000	3,500	3,000	2,500	2,000	1,500	1,000	0,500	2 и
1	16,000	15,000	14,000	13,000	12,000	11,000	10,000	9,000	8,000	7,000	6,000	5,000	4,000	3,000	2,000	1,000	1
									8	7	6	5	4	3	2	1	
									П	о	в	т	о	р	и		

Рисунок 5 – Матриця квантованих значень шкали коінциденції 16 x 16

Повна ж шкала коінциденції включає також і цілочисельну частину із симетричним значенням кількості квантованих точок шкали 80 у діапазоні від 1,0000 до 16,0000.

Для об'єктивного порівняння буде розглядатися лише верхня (дробова) частина шкали коінциденції, яку будемо порівнювати із класичною такої самої розрядності та забезпечувати одночасне покращення і точності, і швидкодії вимірювального перетворення. Необхідно відзначити, що у випадку використання методу коінциденції для частотних та часових вимірювань, де формування та процес збігу (коінциденції) відбувається у часі перетворення, він одночасно є параметром, який підлягає мінімізації, тому тут бажано використовувати мінімальні значення кількості поділок опорної та невідомої частоти, які знаходяться у виділеній на рис. 5 зоні повторів, що дає додатковий вигравш у швидкодії перетворення, і забезпечує ще більш одночасне збільшення і швидкодії (малі значення  $N_{on}$ ,  $N_x$ ), і точності. Шкала 8-коінциденція має вигляд рис. 6, разом із зображеною лінією ідеального перетворення.

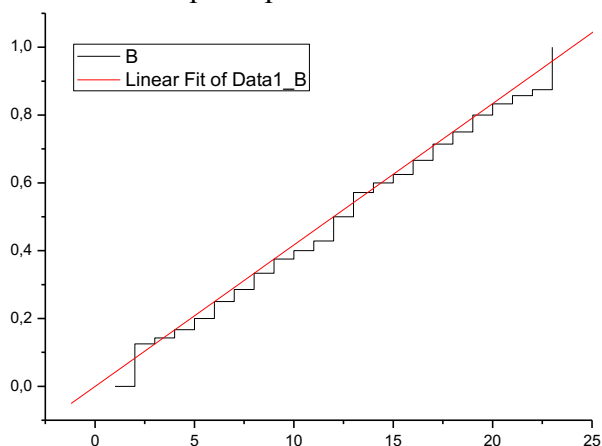


Рисунок 6 – Вигляд шкали перетворення 8 – коінциденція в діапазоні 0...1,0

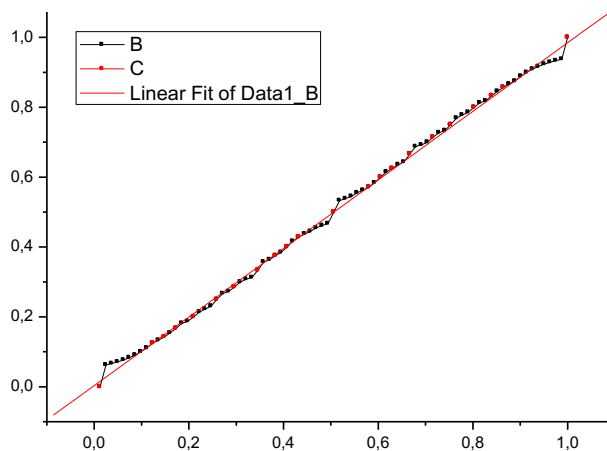


Рисунок 7 – Відхилення від лінійного закону шкали вимірювального перетворення для 16 – коінциденція в діапазоні 0,00...1,00

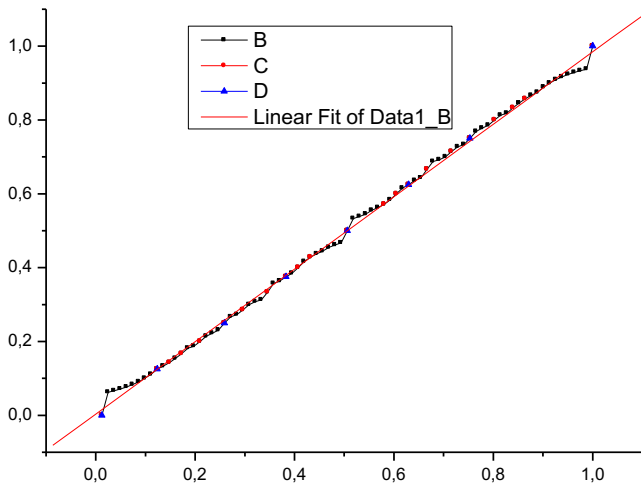


Рисунок 8 – Порівняння шкал вимірювального перетворення для випадку 16 – коінциденція (B) та 8 – коінциденція (C) в діапазоні 0,000...1,000

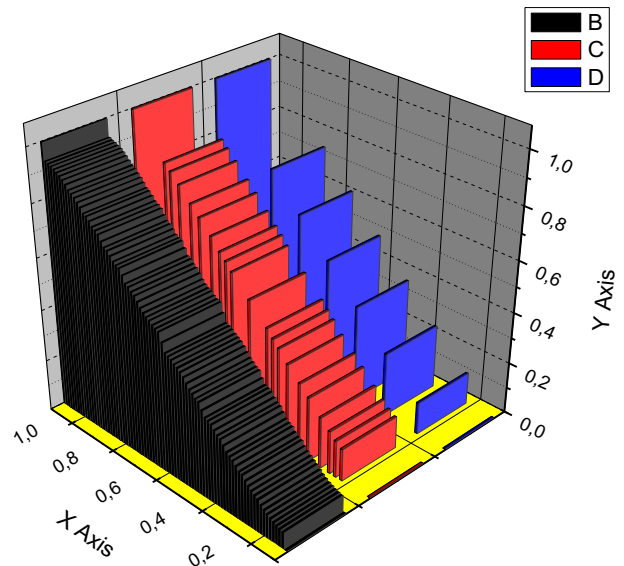


Рисунок 9 – Просторове порівняння шкал вимірювального перетворення для випадку 16 – коінциденція (B) та 8 – коінциденція (C) та 1/8 (D)

**Дослідження моделі АЦП паралельного типу.** Для підтвердження отриманих та викладених вище теоретичних результатів, було проведено моделювання АЦП паралельної дії для випадку 8-розрядної матриці резисторів та використання методу коінциденції у системі PROTEUS. На рис. 10 показано результати моделювання та короткий опис.

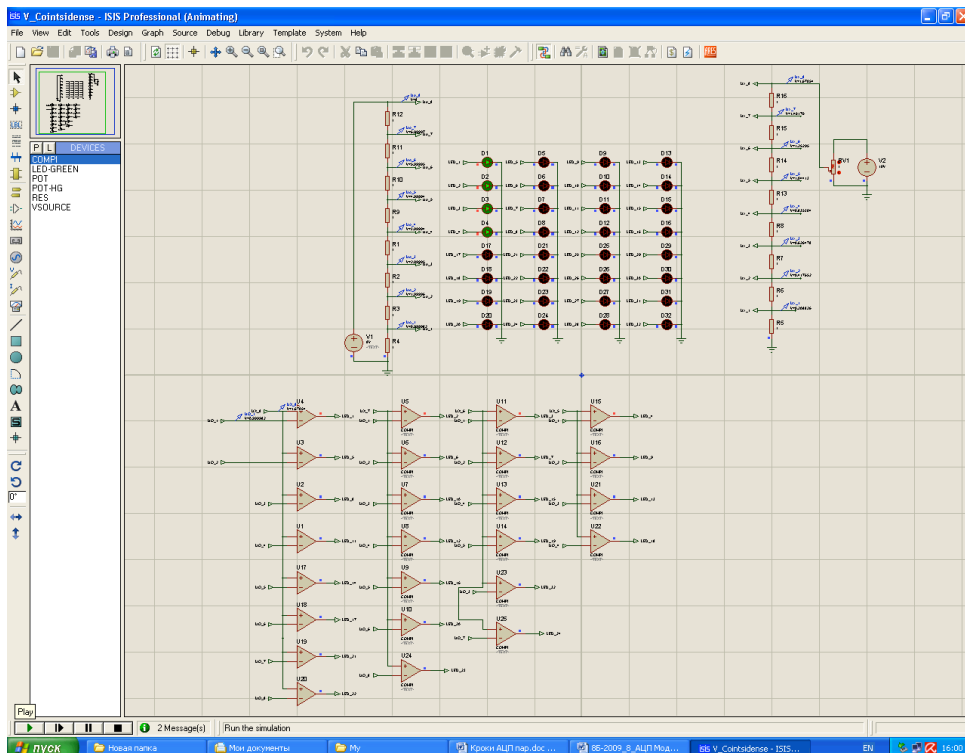


Рисунок 10 – Схема електронного моделювання АЦП\_8R для дослідження особливостей роботи паралельного порівняння за методом коінциденції

Для пояснення принципу організації окремих вузлів покажемо більш детально кожен із вузлових елементів системи моделювання АЦП паралельної дії для випадку 8 розрядних резисторних подільників опорної на вимірювальної напруг.

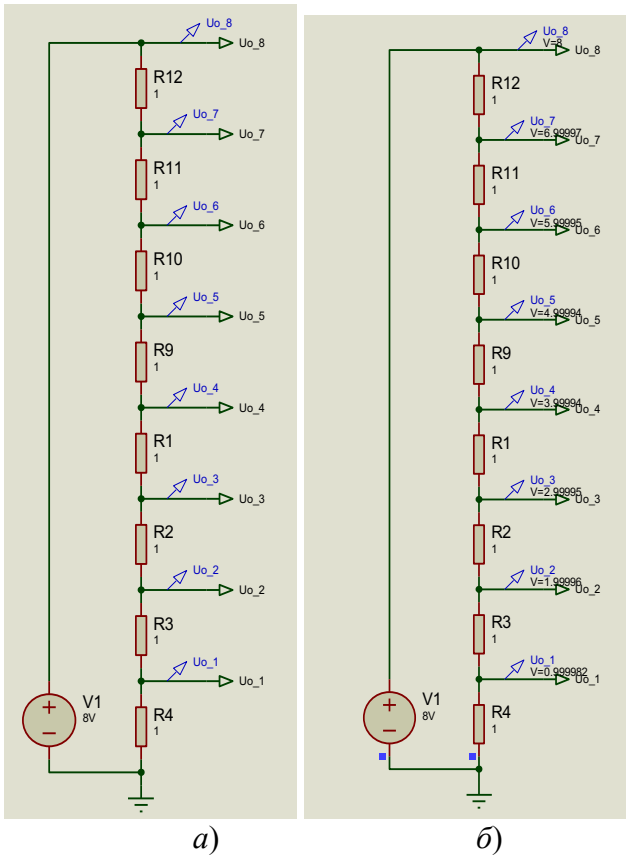


Рисунок 11 – Принципова схема подільника опорного каналу АЦП\_8R: а) загальний вигляд; б) в режимі симуляції рівнів напруг

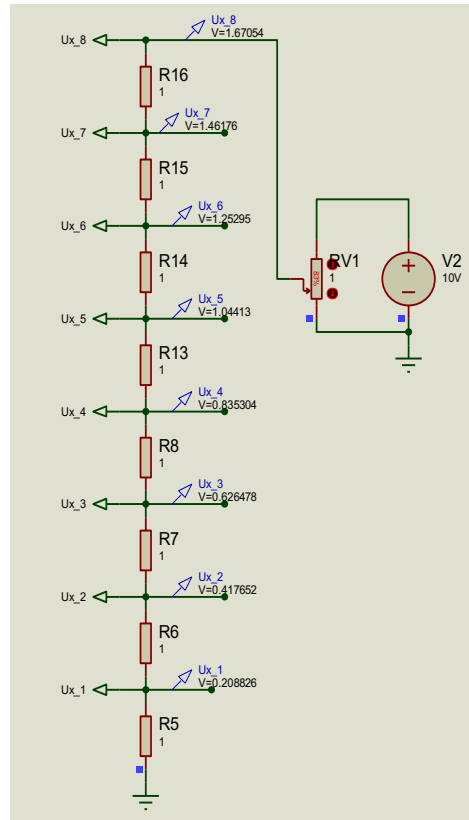


Рисунок 12 – Принципова схема подільника вимірювального каналу АЦП\_8R

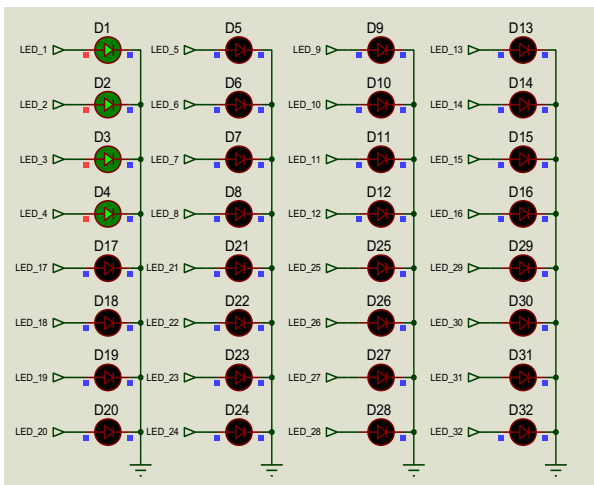


Рисунок 13 – Схема матриці світлодіодів шкали АЦП\_8R

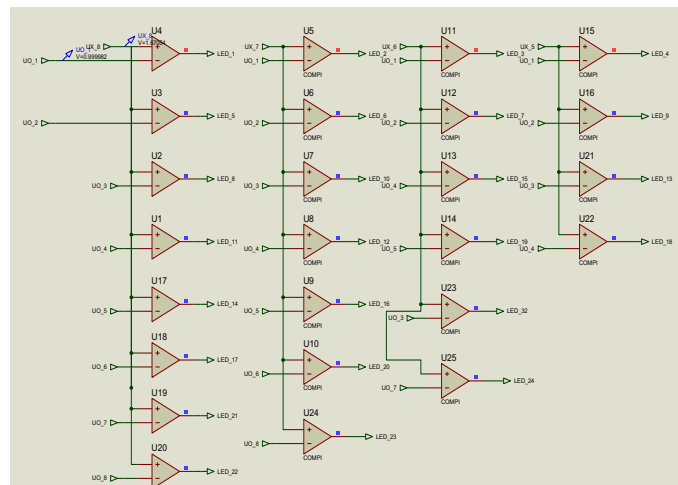


Рисунок 14 – Принципова схема поля компараторів АЦП\_8R

Джерела опорних напруг для зняття характеристики перетворення були вибрані відповідно 10 В – опорне (для забезпечення зручності відліку) та вхідної напруги 12 В – для забезпечення надійного спрацьовування у діапазоні, близькому та більше за 1,000.



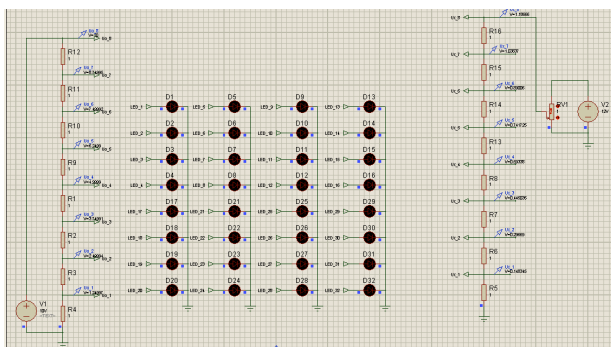


Рисунок 15 – АЦП\_8R  
у нульовій точці перетворення



Рисунок 16 – АЦП\_8R  
у першій точці перетворення

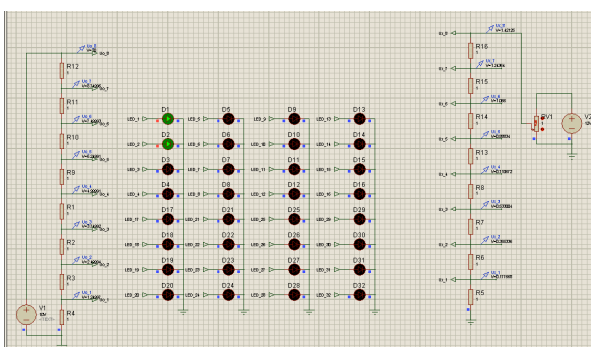


Рисунок 17 – АЦП\_8R  
у другій точці перетворення

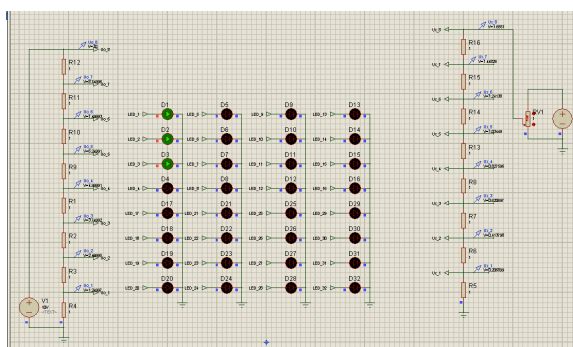


Рисунок 18 – АЦП\_8R  
у третій точці перетворення

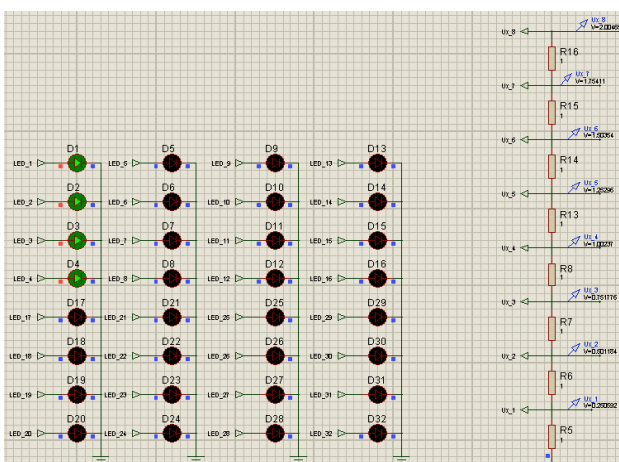


Рисунок 19 – АЦП\_8R  
у четвертій точці перетворення

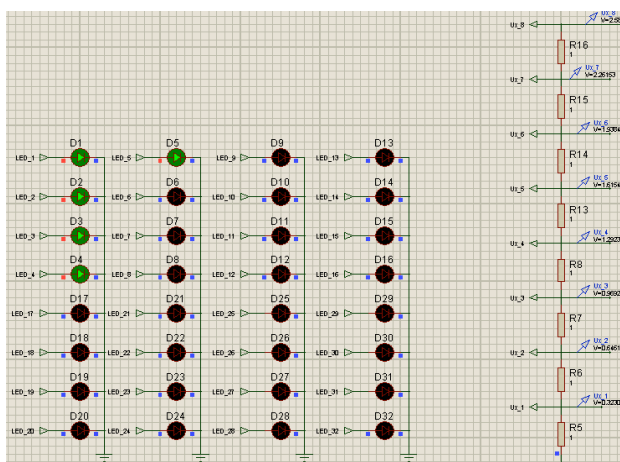


Рисунок 20 – АЦП\_8R  
у п'ятій точці перетворення

В подальшому надано лише покази шкали та рівні вхідної напруги, і прослідкуємо динаміку роботи АЦП в діапазоні до 1,000 і більше.

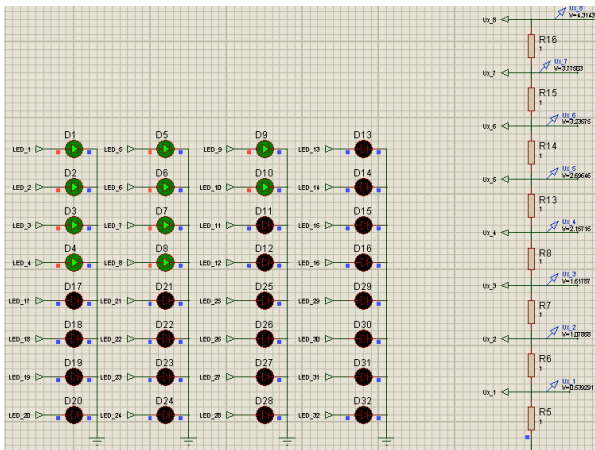


Рисунок 21 – АЦП\_8R у десятій точці перетворення

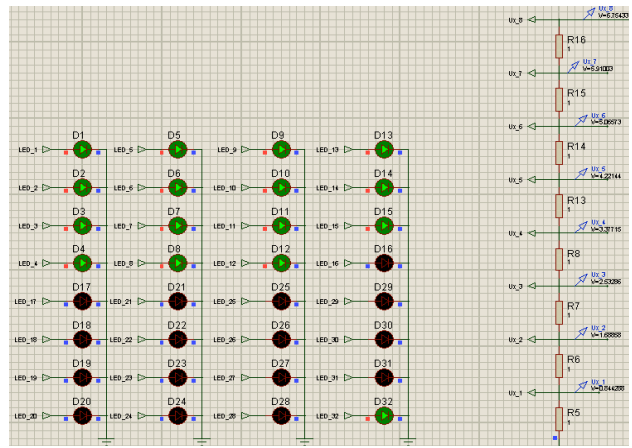


Рисунок 22 – АЦП\_8R у п'ятнадцятій точці перетворення (32 надлишковість)

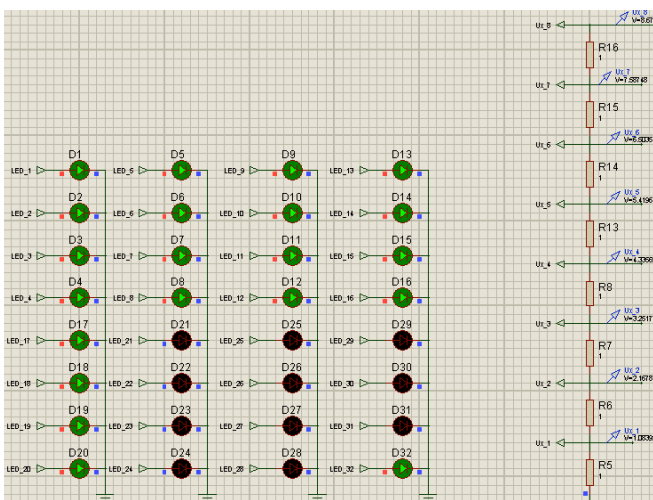


Рисунок 23 – АЦП\_8R у двадцятій точці перетворення (32 надлишковість)

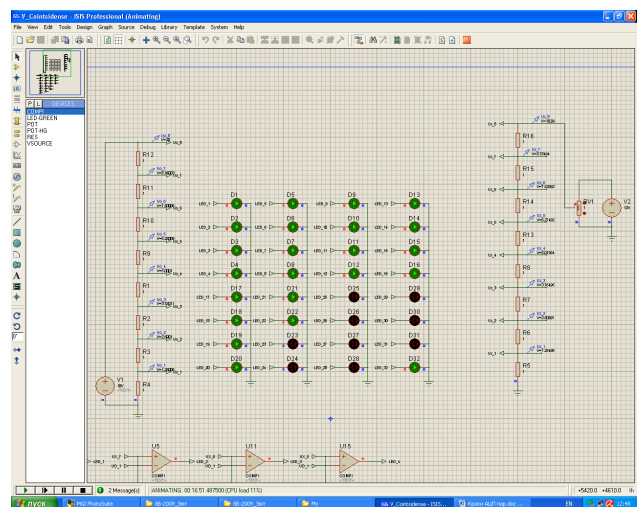


Рисунок 24 – АЦП\_8R у двадцять другій точці перетворення (32 надлишковість)

Необхідно відзначити, що потенціометр RV1 здійснює формування вихідної напруги у відсотках від вхідної, тобто формує лінійну шкалу із кроком в 1%, що для нашого випадку дорівнює 0,12 В, тому цей наявний крок дискретності буде впливати на оцінку роздільної здатності АЦП, але цілком достатній для демонстрації працездатності та забезпечення квантованої вимірювальної шкали перетворення.

**Дослідження новітніх принципів побудови перетворювачів на основі атенюатора-подільника Троцишина.** Тепер, коли ефективність КТВ доведено, і реальний пристрій, який її реалізує для перетворення двовимірної шкали в одновимірну, є атенюатор-подільник Троцишина, продовжимо дослідження саме для використання в якості базового елемента АПТ. Викладання матеріалу розпочнемо із визначення позначок та запису математичних моделей у формалізованому вигляді (табл. 2).

Таблиця 2 – Математичні моделі ЦАП і АЦП

Класичний двійковий ЦАП (АЦП), N_classik	$n_{classik} = \frac{A_i}{2^N}$ , де $A_i \in 1...2^N - 1$ , N – розрядність двійкового коду
Шкала коінциденції N_coincidence	$n_{coenc} = \frac{A_i}{B_j}$ , де $A_i, B_j \in 1...2^N$ , N – кількість значень подільника
Шкала подвійної коінциденції, N_super	$n_{super} = \frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l}$ , де $A_i, B_j, C_k, D_l \in 1...2^N$ , N – кількість значень подільника
Шкала сумарно-різницева, N_D_S	$n_{D_S} = \frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$ , де $A_i, B_j, C_k, D_l \in 1...2^N$ , N – кількість значень подільника
Шкала комбінованого перетворення, N_comby	$n_{comby} = \frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l} \cup \frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$ , де $A_i, B_j, C_k, D_l \in 1...2^N$ , N – кількість значень подільника

Тепер більш детально розглянемо особливості утворення вже відомої [1, 2] шкали коінциденції та її особливості порівнянно з класичною [1, 4]. Так, в табл. 3 надано наглядний для порівняння приклад використання 8R подільника (подільник Кельвіна) [4], (кольорові -8) і шкала коінциденції в діапазоні 0,0... 1,00.

Таблиця 3 – Шкала коінциденції

n-порядк.	Шкала- 8 coincidence	i	j	N
1	0,0000000000000000			
2	0,1250000000000000	A= 1	B= 8	N=57
3	0,1428571428571428	A= 1	B= 7	N=49
4	0,1666666666666667	A= 1	B= 6	N=41
5	0,2000000000000000	A= 1	B= 5	N=33
6	0,2500000000000000	A= 1	B= 4	N=25
7	0,2857142857142857	A= 2	B= 7	N=50
8	0,3333333333333333	A= 1	B= 3	N=17
9	0,3750000000000000	A= 3	B= 8	N=59
10	0,4000000000000000	A= 2	B= 5	N=34
11	0,4285714285714285	A= 3	B= 7	N=51
12	0,5000000000000000	A= 1	B= 2	N=9
13	0,5714285714285714	A= 4	B= 7	N=52
14	0,6000000000000000	A= 3	B= 5	N=35
15	0,6250000000000000	A= 5	B= 8	N=61
16	0,6666666666666666	A= 2	B= 3	N=18
17	0,7142857142857143	A= 5	B= 7	N=53
18	0,7500000000000000	A= 3	B= 4	N=27
19	0,8000000000000000	A= 4	B= 5	N=36
20	0,8333333333333334	A= 5	B= 6	N=45
21	0,8571428571428571	A= 6	B= 7	N=54
22	0,8750000000000000	A= 7	B= 8	N=63
23	1,0000000000000000	A= 1	B= 1	N=1



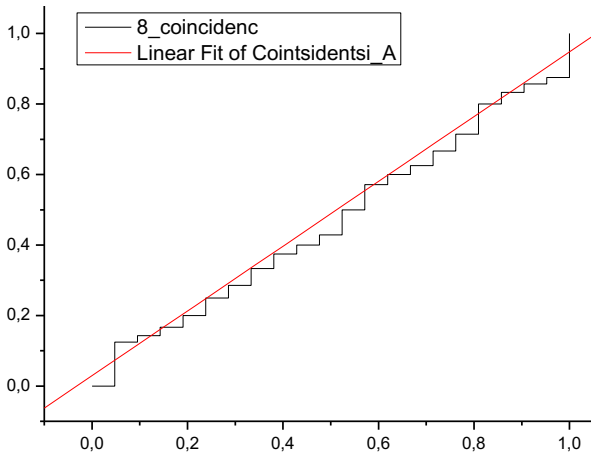


Рисунок 26 – Квантова шкала перетворення АПТ\_8R

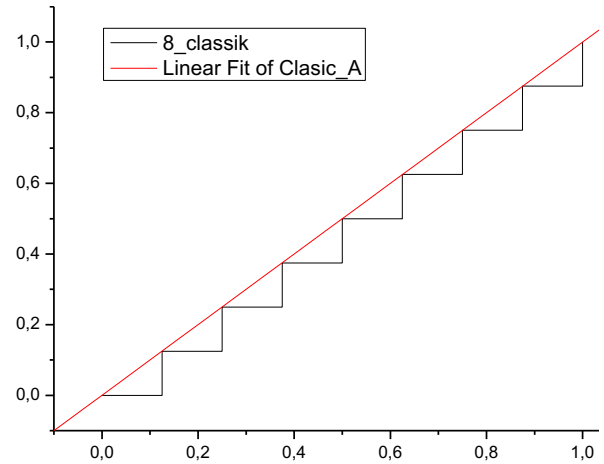


Рисунок 27 – Квантова шкала перетворення АП Кельвіна\_8R

Але КТВ не обмежується лише можливостями шкали методу коінциденції, адже завдяки появі АПТ можливо ставити питання про використання методу коінциденції саме

для нього, який отримав назву «Шкала подвійної коінциденції»  $n_{super} = \frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l}$ , і являє

собой чотиривимірну конструкцію, яка для випадку методу коінциденції має вигляд рис. 28 (цифри 1...22 показують послідовність розташування точок шкали, верхній ряд 1, 5, 8, 11, 14, 17, 21, 22 – класична шкала, зона повторів не використовується).

У той самий час, реалізація  $n_{super} = \frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l}$  дає шкалу вимірювального перетворення

уже із 166 точками шкали, замість 23 у методі коінциденції та 8 у класичному двійковому, і зображена на рис. 28. Саме вказаний приклад є першою спробою повторного використання методу коінциденції із урахуванням того, що замість класичного подільника Кельвіна використовується АПТ, але при цьому збільшуються значення початку та кінця шкали у N разів (N x N).

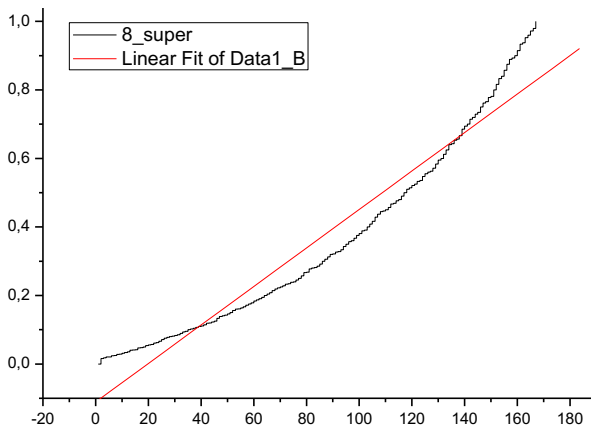


Рисунок 28 – Загальний вигляд шкали вимірювального перетворення для випадку 8R-супер у діапазоні 0,0000...1,00000

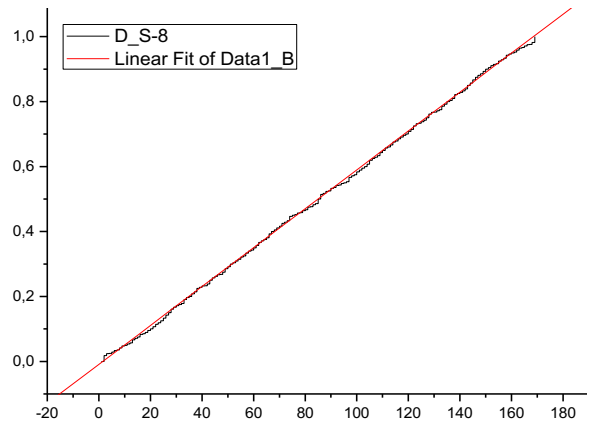


Рисунок 29 – Шкала вимірювального перетворення методу  $n_{D-S} = \frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$

При всіх позитивах збільшення кількості поділок більше ніж у десять разів, шкала має виражений логарифмічний масштаб, що пов'язано із використанням добутків, які дають ще й добуток двох таблиць множення Піфагора  $[8 \times 8]$ .

Для вирішення питання покращення лінійності шкали розроблено метод  $n_{D\_S} = \frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$ , який названо сумарно-різницевим (дельта-сигма). На рис. 29, наведено

шкалу його вимірювального перетворення. Суть методу полягає у використанні лінійної комбінації двох вимірювальних перетворювачів, утворених АПТ. Значення точок шкали утворюються як «інтерференція» між усіма выводами та кодовими комбінаціями АПТ, які вибираються згідно з висновками КТВ, що передбачає використання повного набору всіх можливих значень, а не лише «зручних» двійкових, що використовують у класичних ЦАП і АЦП.

Очевидним є значне покращення параметрів роздільної здатності до 169 точок і особливо лінійності порівняно із попередніми.

Виходячи із висновків КТВ та враховуючи дію принципу суперпозиції, можливо використання комбінованої шкали вимірювального перетворення:

$n_{comby} = \frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l} \cup \frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$ , і на підтвердження на рис. 30 надано її порівняння (в

діапазоні половини шкали) зі шкалою коінциденції. При цьому необхідно зауважити, що вказана комбінована шкала не є простою сумою всіх значень, а є об'єднанням множин обох

утворюючих шкал:  $n_{comby} = [\frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l}] \cup [\frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}]$ .

При цьому, спільні значення для обох шкал є величиною змінною, а їх кількість зі зростанням N спадає, що буде досліджено у подальшому, і головне дозволяє оптимізувати

вибір точок шкали або із  $\frac{A_i}{B_j} / \frac{C_k}{D_l}$ , або із  $\frac{A_i}{B_j} \pm \frac{C_k}{D_l}$ .

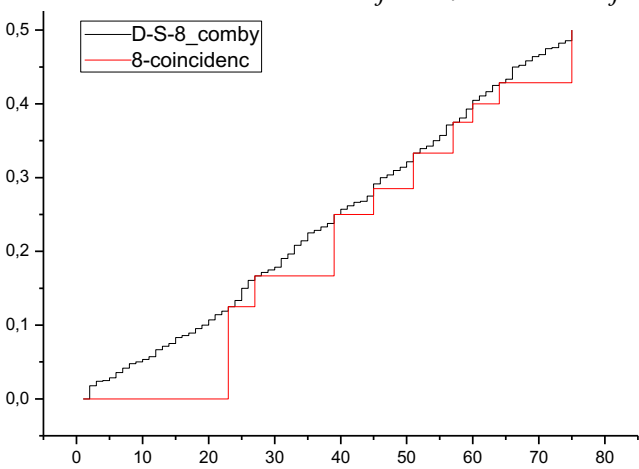


Рисунок 30 – Порівняння комбінованої шкали зі шкалою коінциденції

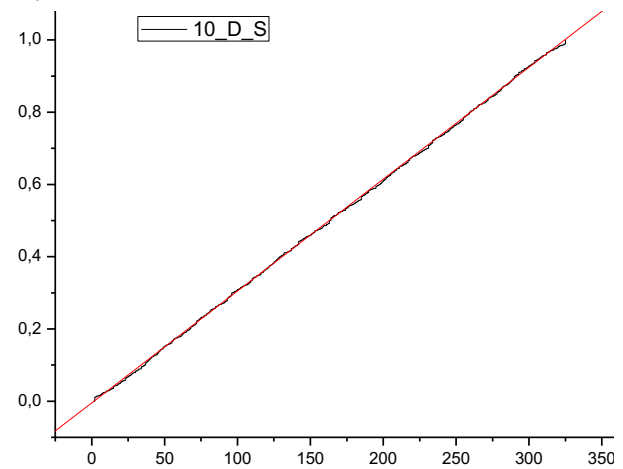


Рисунок 31 – Шкала 10\_D\_S;

Порівняння виконано для половини шкали, оскільки друга частина є симетричним відображенням, першої половини. Основну увагу потрібно звернути на те, що на першій сходинці коінциденції, де спостерігається найбільший стрибок кроку квантування, додатково з'явилися 22 додаткові «сходинки», які відповідно до 20 разів зменшують вказану похибку, і відповідно збільшують роздільну здатність шкали.

Необхідно відзначити, що додаткові «сходинки» з'явилися і в межах точок шкали коінциденції, друга та наступні, хоча і в менших кількостях. У той самий час результуюча шкала стала значно більш лінійною, що буде показано в подальших варіантах вимірювальних шкал  $N_{comby}$ , а також для шкал  $N_{D\_S}$ , або  $N_{super}$ .

Для аналізу ефективності розроблених унікальних методів побудови ЦАП АЦП в рамках теорії квантових вимірювань надаємо порівняльну таблицю ефективних параметрів та характеристик розглянутих видів перетворення в табл. 5.

Таблиця 5 – Зведені параметри та характеристики видів перетворення

N R	n-шкали N_D_S	n-шкали N_Super	n-шкали N_D_S + N_Super	n-шкали N_comby	n-шкали N_comby / n-шкали N_D_S (приріст значень)
2	3	3	6	4	1,333
4	13	17	30	22	1,69
6	45	56	101	76	1,68
7	117	128	245	176	1,50
8	169	166	335	247	1,46
10	325	276	601	460	1,415
12	725	568	1293	965	1,33
14	1445	1097	2542	1868	1,292
15	1749	1275	3024	2270	1,297
16	2141	1461	3602	2728	1,274
20	6029	3946	9975	7302	1,211
24	11525	7190	18715	13847	1,201
32	39413	21678	61091	44919	1,139
64	568295	270594	838889	630857	1,11

Для аналізу надано не лише характерні (двійкові значення 2, 4, 8, 16, 32, 64), а і звичайні числові, які не використовуються в існуючих ЦАП і АЦП [4-5].

Необхідно відзначити, що у зазначених прикладах реальна кількість поділок у 2...5 разів більша за потрібну, що дозволяє додатково лінеаризувати та адаптувати шкалу перетворення, яка може досить просто коригуватися шляхом програмування використовуваних точок перетворення, що принципово неможливо у класичних методах і наглядно показано на рис. 32 і 33 для формування шкали із двох АТП10.

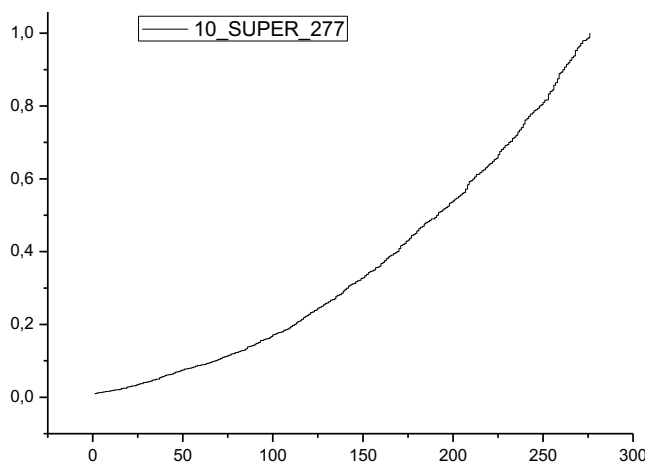


Рисунок 32 – Шкала 10\_Super

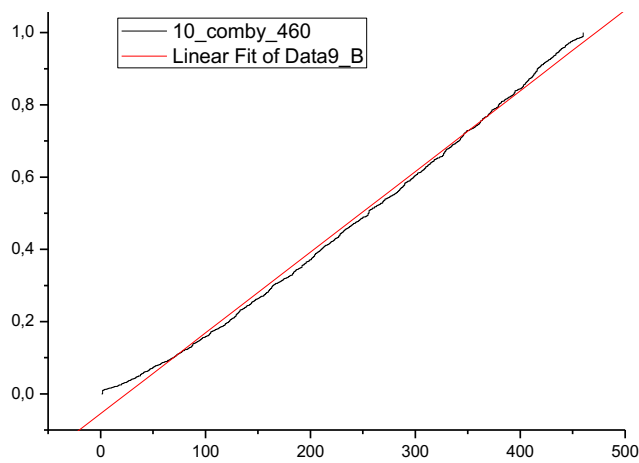


Рисунок 33 – Шкала 10\_comby

Як бачимо, об'єднання двох шкал  $[10\_D\_S] \cup [10\_Super] = 10\_comby$  дало можливість із 325 та 277 значень отримати єдину шкалу 10\_comby із 460 точками шкали перетворення в діапазоні 0,000...1,0000. Із рис. 30 і 33 виходить, що параметр лінійності (відхилення) після об'єднання шкал покращився із 0,0032 (середнє значення) до 0,002. Тепер же, використовуючи надлишковість 460 замість необхідних 256 (для побудови еквівалента

8-бітного ЦАП), можна деталізувати шкалу і провести адаптацію за відхиленням на кожній ділянці окремо.

Аналізуючи шкали та їх кількісні характеристики, не важко помітити, що реальним стає питання побудови ЦАП (АЦП) зі шкалою 256 (еквівалент 8-розрядний) всього на 20 однакових резисторах включених за схемою АПТ10, або ж отримання 17...18-розрядних перетворювачів усього при використанні АПТ64.

Схеми реалізації мають значно меншу кількість резисторів подільника, відсутній ефект розриву шкали характерний матрицям R-2R, і саме головне, сигнал ділиться максимально 64 рази, а не у сотні тисяч, що значно покращує співвідношення сигнал/шум.

Необхідно відзначити, що у зазначених прикладах реальна кількість поділок у 2...5 разів більша за потрібну, що дозволяє додатково лінеаризувати та адаптувати шкалу перетворення, яка може досить просто коригуватися шляхом програмування використовуваних точок перетворення, що принципово неможливо у класичних методах.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Троцишин І.В. Квантова теорія випромінювань: принципи та методи вимірювального перетворення параметрів радіосигналів / І.В. Троцишин, О.П. Войтюк, Н.І. Троцишина // Матеріали Одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції ["Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"], (ВОТТП\_11\_2012), (Хмельницький, 5 - 8 червня 2012 р.). – Хмельницький. – С. 25–28.

2. Пат. 100581, Україна, МПК (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200), Спосіб побудови атенюатора-подільника Троцишина / Троцишин І.В.; заявник і патентовласник, заявлено 23.10.2011; опубліковано 10.01.2013, Бюл. № 1.

3. Троцишин І.В. ЦАП і АЦП на основі атенюатора-подільника троцишина (АПТ) і його модифікації / Троцишин І.В., Войтюк О.П., Троцишин М.І. // Матеріали Одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції ["Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"], (ВОТТП\_11\_2012). (Хмельницький, 5 - 8 червня 2012 р.). – Хмельницький. – С.100-103.

4. Троцишин І.В. Новое поколение ЦАП-АЦП с программируемыми параметрами характеристики преобразования на основе атенюатора-делителя Троцишина / И.В.Троцишин // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments-2012: Сборник трудов XI международной научно-практической конференции, (Москва, 6-7 декабря 2012 г), – М. – С. 420-422.

5. Троцишин І.В. ЦАП-АЦП на основі атенюатора-делителя Троцишина с программируемыми параметрами характеристики преобразования / И.В.Троцишин // Матеріали 67-ї науково-технічної конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів, (Одеса, 5-7 грудня 2012р.). – Одеса. – С. 70-75.

#### REFERENCES:

1. Trotsyshyn I.V. Quantova teoriya vymirunan: Principy ta Methody vymiruvalnogo peretvorennia parametriv radiosignaliv / I.V. Trotsyshyn, O.P. Voytyuk, N.I. Trotsyshyna // Materialy 11-y misznarodnoi naukovo-tehnithoi konferencii ["Vymiruvalna ta obthysluvalna tekhnika v tekhnologithnykh procesakh"] (VOTTP\_11\_2012), Khmel'nitsky 5 - 8 June 2012. in., Khmel'nitsky S.25-28

2. Patent 100581, Ukraine, IPC (2013.01) G01R 15/00 G06G 7/16 (2006.01) G11C 8/00 H02M 3/06 (200) Sposib pobudovy attenuatora-podilnyka Trotsyshyna. Zaiavnyk I patentovlasnyk Trotsyshyn I.V.. zaiavleno 23.10.2011; opubl. 10/01/2013, Bull. № 1.

3. Trotsyshyn I.V. CAP I ACP na osnovi atenuatora-podilnyka Trotsyshyna (APT) I yogo modifykazi / I.V Trotsyshyn, O.P. Voytyuk, M.I. Trotsyshyn // Materialy 11-y misznarodnoi naukovo-tehnithoi konferencii ["Vymiruvalna ta obthysluvalna tekhnika v tekhnologithnykh procesakh"] (VOTTP\_11\_2012), Khmel'nitsky 5 - 8 June 2012. in., Khmel'nitsky, S.100-103.

4. I.V.Trotsyshyn. Nove pokolenie CAP- ACP s prohrammyruemymi parameterami charakteristiki preobrazovania na osnove based on attenuatora-dtlitelia Trotsyshyna / I.V.Trotsyshyn // Inzhenernyi i nauthnye prilozhenia na baze tehnolohy National Instruments-2012; Sbornyk trudov XI- y mezhdunarodnoy nauthnopraktitheskoj konferencii, 6-7 December 2012. Moscow, S. 420-422.

5. Trotsyshyn I.V. CAP- ACP na osnove attenuatora-dtlitelia Trotsyshyna s programmiруемыми параметрами характеристики преобразования / I.V.Trotsyshyn // Materialy 67-i - naukovo-tehnithnoi konferenc. Proforskogo-vykladazkogo skladu, naukovziv, aspirantiv ta studentiv, (Odesa, 5-7 grudnia 2012r.).Odesa S. 70-75.