

**Pracownia Konstrukcji i Eksploatacji Urządzeń Cyfrowych**  
**Pracownia Konstrukcji i Eksploatacji Urządzeń Elektronicznych**

**Badanie przetworników C/A i A/C**

*opracowali:*

*Irena Hoja*

*Henryk Kiersnowski*

Sprawozdania wykonał:.....

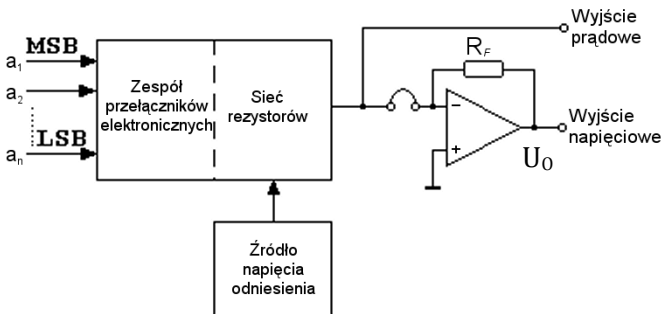
Klasa:.....

# 1. Wprowadzenie

Przetworniki cyfrowo – analogowe **C/A** (ang **D/A** – *digital to analog converter*) i analogowo – cyfrowe **A/C** (ang. **A/D** – *analog to digital converter*) mają za zadanie zmieniać postać sygnałów sterujących wyrażonych albo w postaci analogowej albo w postaci cyfrowej nie wprowadzając przy tym zmian ich wartości względnych.

## PRZETWORNIKI CYFROWO – ANALOGOWO

Zadaniem przetworników C/A jest zamiana sygnału cyfrowego w postaci n-bitowego słowa w odpowiednim kodzie na sygnał analogowy (prąd lub napięcie) o określonej wartości i znaku



Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika c/a

binarnym oraz od wartości sygnału odniesienia  $U_{odn}$ .

Przykładowo dla kodu binarnego sygnał wyjściowy  $U_0$  jest równy:

$$U_0 = \frac{U_{odn}}{2^n} (a_{n-1}2^{n-1} + \dots + a_22^2 + a_12^1 + a_02^0) \quad (*)$$

Gdzie:  $a_{n-1}, \dots, a_0$  – poszczególne bity słowa kodowanego

$n$  – liczba bitów słowa kodowanego

### Podstawowe parametry przetworników c/a

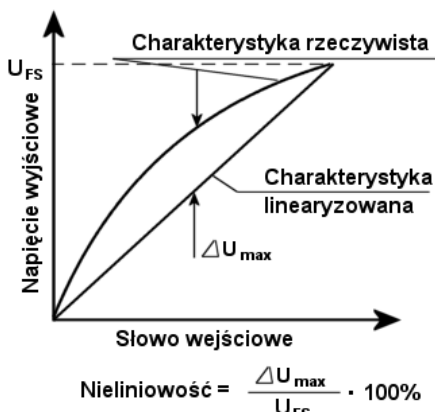
- **Rozdzielczość** – najmniejsza zmiana sygnału wyjściowego.

$$\Delta U = \frac{U_{odn}}{2^n} [mV]$$

Na podstawie długości słowa wejściowego można określić najmniejszą zmianę sygnału wyjściowego w odniesieniu do całego zakresu. Dla przetwornika  $n$  - bitowego można uzyskać  $2^n$  różnych wartości sygnału wyjściowego. Wynika stąd, że zmiana słowa wejściowego na pozycji najmniej znaczącej (LSB) stanowi  $1/2^n$  część pełnego zakresu przetwarzania. Często tę właśnie wartość, wyrażoną w procentach, podaje się jako rozdzielczość przetwornika c/a.

Np. dla długości słowa wejściowego 10 bitów rozdzielczość jest równa:

$$\frac{1}{2^{10}} \cdot 100\% = 0,0977\%$$



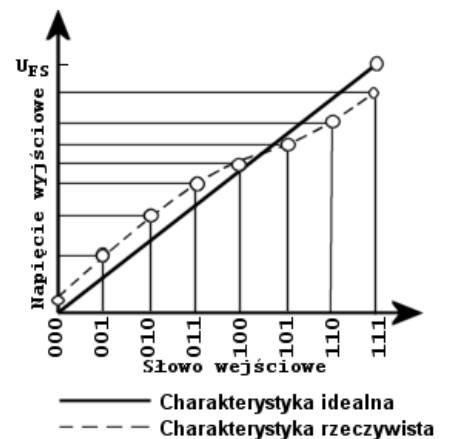
$$\text{Nieliniowość} = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{FS}} \cdot 100\%$$

Rys. 3. Sposób określenia nieliniowości

Przetwornika c/a składa się z:

- zespołu przełączników analogowych sterowanych wejściowymi sygnałami cyfrowymi,
- sieci rezystorów precyzyjnych
- źródła napięcia odniesienia,
- przetwornika prąd - napięcie w układzie ze wzmacniaczem operacyjnym w. przetwornikach c/a z wyjściem napięciowym.

Wartość analogowa sygnału wyjściowego  $U_0$  zależy od wejściowego słowa cyfrowego podanego np.: w kodzie



Rys.2. Charakterystyka przetwarzania dla 3-bitowego przetwornika c/a

✓ **Dokładność** – różnica między wartością zmierzoną a przewidywaną napięcia wyjściowego odniesioną do napięcia pełnej skali. Dokładność można wyznaczyć na podstawie porównania charakterystyki rzeczywistej i idealnej (rys. 2). Charakterystyka przetwarzania jest z natury swojej nieciągła. Wygodnie jednak jest posługiwać się linią ciągłą, otrzymaną przez połączenie wszystkich punktów charakterystyki. W idealnym wypadku jest to linia prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych. Charakterystyka rzeczywista uwzględnia błędy nieliniowości przetwarzania, nie zrównoważenia układu oraz błąd skalowania. Sumaryczny błąd określający dokładność powinien być mniejszy od połowy zmiany napięcia wyjściowego, odpowiadającej zmianie najmniej znaczącego bitu (w skrócie

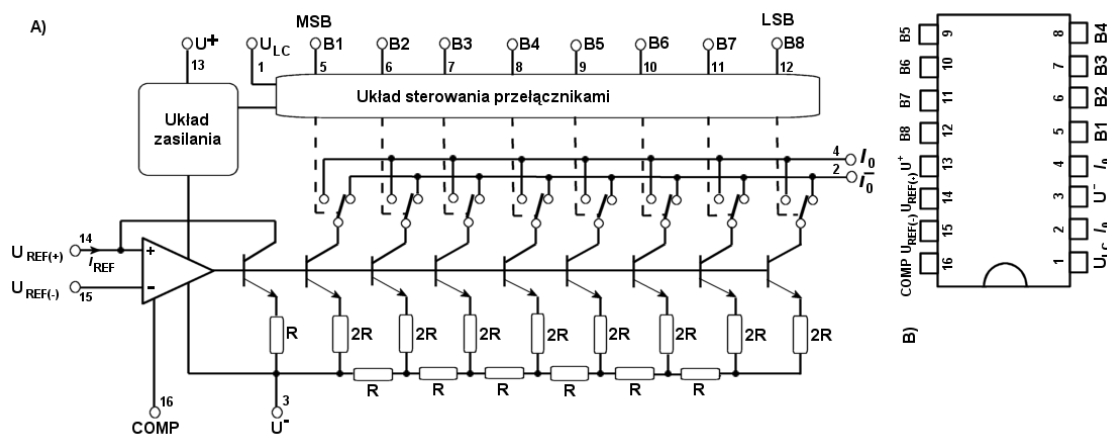
zapisuje się  $\frac{1}{2}LSB$ ). Istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność, ze względu na brak możliwości regulacji, jest nieliniowość. Określa się ją przez podanie maksymalnego odchylenia charakterystyki rzeczywistej od prostej przechodzącej przez punkt początkowy i końcowy charakterystyki rzeczywistej. Wartość tę odnosi się do zakresu przetwarzania i wyraża w procentach (rys. 3).

- ✓ **Błąd bezwzględny** – największa różnica między zmierzonym napięciem wyjściowym a obliczonym ze wzoru ( $*$ )
- ✓ **Błąd względny** – stosunek błędu bezwzględnego do wartości napięcia odniesienia,
- ✓ **Szybkość działania** przetwornika określa się przez pomiar czasu ustalenia, tzn. czasu, po którym napięcie wyjściowe osiągnie wartość ustaloną określonym błędem (zwykle  $\frac{1}{2}LSB$ ). Najszybszymi są przetworniki ze źródłami prądowymi bez wyjściowych konwerterów prąd-napięcie.

### Przetwornik scalony c/a typu DAC-08

Układ DAC-08 jest 8-bitowym mnożącym przetwornikiem c/a o dużej szybkości działania. Schemat blokowy układu wraz z oznaczeniami wyprowadzeń przedstawiono na rys. 4. Przetwornik DAC-08 zawiera:

- ✓ zespół 8 źródeł prądowych ze wzmacniaczem operacyjnym,
- ✓ drabinkę rezystorową R-2R,
- ✓ zespół 8 przełączników,
- ✓ układ sterowania przełącznikami,
- ✓ układ polaryzacji.

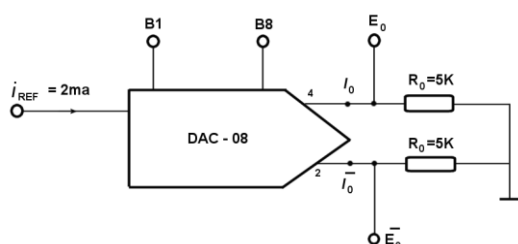


Rys. 4. Przetwornik analogowo-cyfrowy DAC-08: A) schemat wewnętrzny, B) topologia wyprowadzeń

Końcówka  $U_{LC}$  umożliwia przystosowanie przetwornika do współpracy z elementami cyfrowymi należącymi do różnych rodzin. W układzie tym prąd odniesienia  $I_{REF}$ , tzn. prąd wpływający do wejścia  $U_{REF(+)}$  może mieć wartość ustaloną lub zmieniać się w zakresie od 0 do 4mA. Prąd pełnego zakresu  $I_{FS}$  jest liniową funkcją prądu odniesienia  $I_{REF}$  zgodnie z zależnością

$$I_{FS} = I_0 + \bar{I}_0 = \frac{255}{256} \cdot I_{REF}$$

gdzie  $I_{REF}$  jest prądem ustalonym zewnątrz.



Rys. 5. Przetwornik z wyjściem napięciowym

Przetwornik DAC-08 ma dwa komplementarne wyjścia prądowe  $I_0$  oraz  $\bar{I}_0$ . Wartość prądu  $I_0$  zależy od wartości prądu  $I_{REF}$  i od stanu wejść cyfrowych. Najprostszą metodą uzyskania napięciowego sygnału wyjściowego jest dołączenie rezystorów obciążających. Przykładowy schemat jest przedstawiony na rys. 5. W układzie tym napięcia wyjściowe przyjmują wartości tylko ujemne.

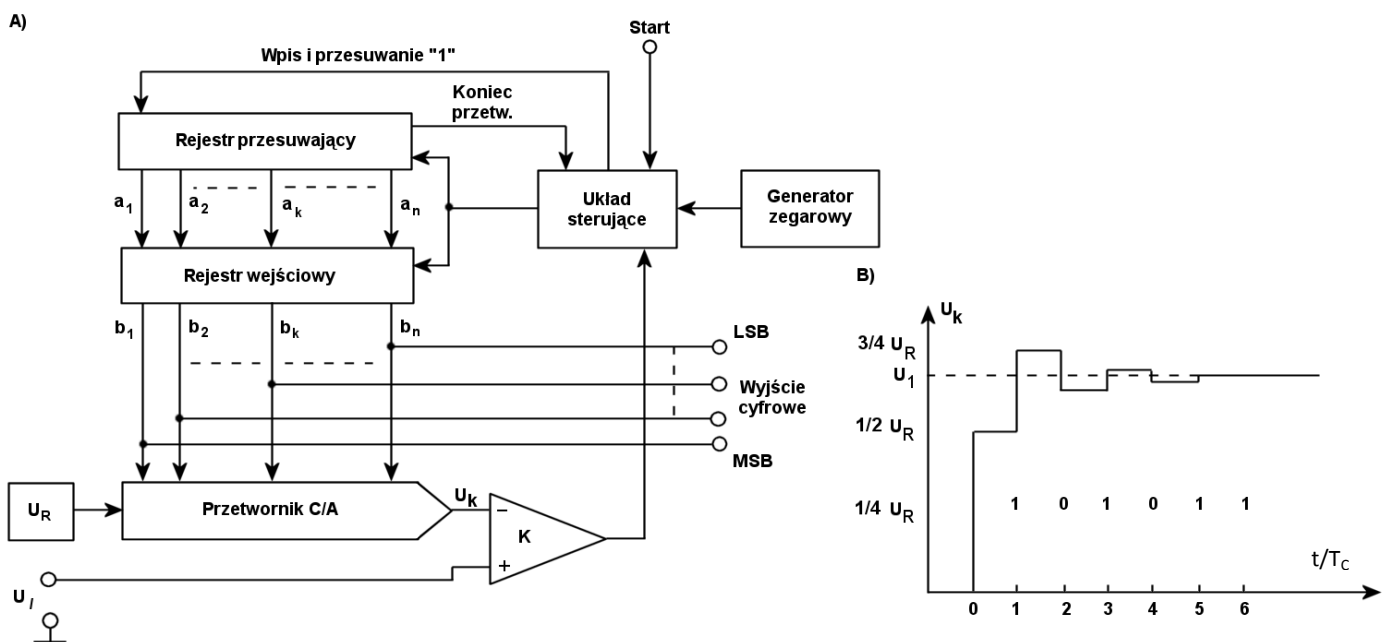
## PRZETWORNIKI ANALOGOWO-CYFROWE

Zadaniem przetwornika a/c jest przetworzenie analogowej postaci sygnału, zwykle napięciowego, na równoważną mu wartość cyfrową. Ogólnie metody przetwarzania można podzielić na metody bezpośrednie i pośrednie. W układach opartych na metodach bezpośrednich następuje od razu porównanie wielkości przetwarzanej z wielkością odniesienia. Do tej grupy zalicza się przetworniki z bezpośrednim porównywaniem oraz przetworniki kompensacyjne. Przy metodach pośrednich najpierw odbywa się zmiana wielkości przetwarzanej na pewną wielkość pomocniczą ( np. czas lub częstotliwość), porównywaną następnie z wielkością odniesienia. W zależności od rodzaju wielkości pomocniczej wyróżnia się metodę częstotliwościową i metodę czasową (prostą lub z dwukrotnym całkowaniem). Ważnym zagadnieniem jest określenie minimalnej częstotliwości próbkowania zapewniającej pełne odtworzenie sygnału analogowego po przetworzeniu go na postać cyfrową. Problem ten został teoretycznie rozwiązany przez C. Shannona oraz W. Kotelnikowa i sformułowany w postaci tzw. **prawa próbkowania**. Mówi ono, że cała informacja zawarta w sygnale ciągłym zmieniającym się w czasie może być wyrażona za pomocą kolejnych próbek cyfrowych jego wartości, jeśli częstotliwość próbkowania  $f$  jest co najmniej dwukrotnie większa od maksymalnej częstotliwości  $f_{max}$  występującej w widmie sygnału. Najpowszechniej obecnie stosowanym metodami przetwarzania są te, które dobrze nadają się do realizacji za pomocą układów scalonych lub do realizacji monolitycznej. Do tych metod należą:

- ✓ metoda bezpośredniego porównania,
- ✓ metoda kompensacyjna wagowa ( z kolejnym porównaniem),
- ✓ metoda czasowa z dwukrotnym całkowaniem,
- ✓ metoda częstotliwościowa.

### Metoda kompensacyjno - wagowa

Przetwarzanie w tej metodzie polega na kolejnym porównywaniu napięcia przetwarzanego  $U_I$  (rys. 6) z napięciem odniesienia wytwarzanym w przetworniku c/a. W pierwszej kolejności następuje porównanie napięcia  $U_I$  z napięciem  $U_R/2$ , odpowiadającym połowie pełnego zakresu przetwarzania. Rezultat tego porównania ustala w rejestrze wartość cyfrową najstarszego bitu słowa wyjściowego oraz wartość najstarszego bitu wejścia przetwornika c/a. W ten sposób, gdy  $U_I > U_R/2$ , to napięcie  $U_R/2$  pozostaje włączone podczas następnych porównań, a w przeciwnym razie – jest wyłączone. W przypadku przetwornika  $n$ -bitowego pełny cykl przetwarzania obejmuje  $n$  porównań. Po  $n$ -tym porównaniu stan rejestru wyjściowego jest cyfrową reprezentacją napięcia  $U_I$ .



Rys. 6. Przetwarzanie a/c metodą kompensacji wagowej ( z kolejnymi porównaniami): A) schemat blokowy, B) przebiegi napięcia na wyjściu przetwornika c/a w przypadku słowa wyjściowego 101011;  $T_c$  – okres generatora zegarowego

Zaletą metody kompensacji wagowej jest krótki czas przetwarzania równy  $nT_C$  (gdzie  $T_C$  czas trwania jednego kroku) i jest on niezależny od wartości przetwarzanego napięcia. Wadą metody jest duża nieliniowość różniczkowa uwarunkowana właściwościami przetwornika  $c/a$ .

### Podstawowe parametry przetworników a/c

**Dokładność przetwarzania** jest miarą dokładności cyfrowego odwzorowania sygnału analogowego i jest ograniczona przez błędy powstające w procesie przetwarzania. Przetwornik a/c ma cechy zarówno układu cyfrowego, jak i analogowego. Z jego właściwościami jako układu cyfrowego związany jest błąd kwantyzacji, określający rozdzielczość przetwarzania, a z cechami analogowymi – błędy analogowe wyrażone przez dokładność względną i bezwzględną.

- **rozdzielczość** wyraża najmniejszą wielkość sygnału wejściowego rozróżnialną przez przetwornik

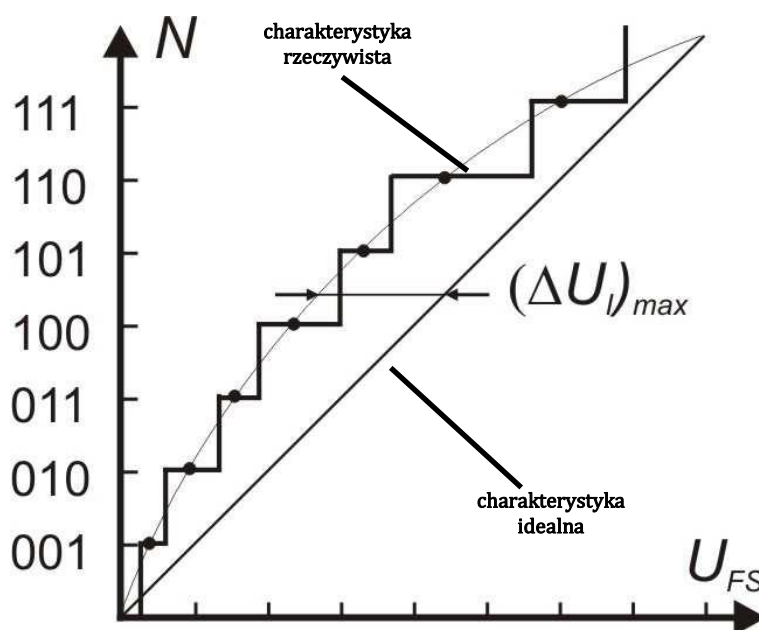
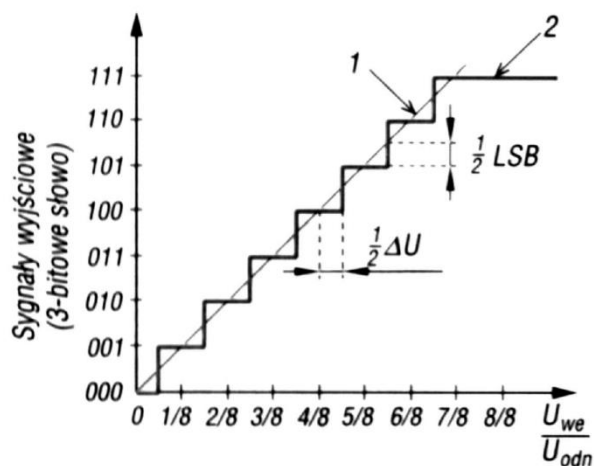
$$\Delta U = \frac{U_{FS}}{2^n} [mV]$$

$U_{FS}$  – nominalny pełny zakres przetwarzania,

$n$  – liczba bitów słowa wyjściowego

- **rozdzielczość względna** wyrażona jako wartość  $100\% / 2^n$

- **błąd kwantyzacji** ( $\pm\Delta U/2$  lub  $LSB/2$ ) – odchyłka rzeczywistej charakterystyki schodkowej od charakterystyki idealnej.
- **dokładność bezwzględna**  $(\Delta U_I)_{max}$  jest określana jako różnica między teoretyczną i rzeczywistą wartością napięcia  $U_I$ , powodującą powstanie na wyjściu określonej wartości cyfrowej, przy czym wartości  $U_I$  wyznacza się jako punkty środków przedziałów kwantowania na idealnej i rzeczywistej charakterystyce przetwarzania



Rys. 7. Charakterystyka przetwornika a/c

- **dokładność względna** jest określana jako wartość dokładności bezwzględnej odniesiona do pełnego nominalnego zakresu przetwarzania i wyrażona w procentach lub w częściach wartości najmniej znaczącego bitu,
- **nieliniowość całkowita** (ang. *integral nonlinearity*) jest określana jako maksymalna różnica  $(\Delta U_I)_{max}$  napięcia wejściowego pomiędzy rzeczywistą charakterystyką przetwarzania  $N = f(U_I)$  a charakterystyką idealną, odniesiona do maksymalnej wartości napięcia przetwarzania  $U_{FS}$  ( $U_{max}$ ), wyrażona w procentach. Charakterystykę idealną wyznacza się jako prostą łączącą skrajne punkty zakresu przetwarzania, charakterystykę rzeczywistą natomiast jako linię łączącą środki przedziałów napięcia  $U_i$ , odpowiadających kolejnym wartościom cyfrowym na wyjściu przetwornika.

$$\varepsilon_c = \frac{(\Delta U_I)_{max}}{U_{FS}} 100\%$$

## 2. Literatura

- Głocki W., Grabowski L.: Pracownia podstaw techniki cyfrowej, WSiP – 1998,
- Kulka Z., Libura A., Nadachowski M.: Przetworniki analogowo – cyfrowe i cyfrowo – analogowe, WKiŁ – 1987
- Pióro B., Pióro M.; Podstawy elektroniki cz. 2.; Warszawa 1997
- ADC0804 <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/intersil/fn3094.pdf>

Imię i nazwisko:	Klasa:	Stanowisko:	Nr w dzienniku:
Skład grupy:.....			
Temat ćwiczenia: <b>Badanie przetworników analogowo-cyfrowych (a/c) i cyfrowo-analogowych (c/a)</b>			Data:
Przygotowanie do ćwiczenia	Wykonanie ćwiczenia	Sprawozdanie z ćwiczenia	
Pkt.:	Pkt.:	Pkt.:	
Suma punktów:			
Ocena z przeprowadzonego ćwiczenia:			Podpis nauczyciela:

Przypomniano o stosowaniu zasad bezpiecznej pracy i przestrzeganiu instrukcji BHiP.

#### Zestaw przyrządów:

- .....
- .....
- .....

#### ZADANIA POMIAROWE

##### 1. Badanie przetwornika analogowo – cyfrowego ADC0804 (.....)}

- Wykonaj pomiary do charakterystyki przejściowej przetwornika a/c –  $N = f(U_I)$ 
  - odczytaj wartości binarne (cyfrowe) z wyjścia przetwornika a/c w zależności od napięcia wejściowego  $U_I$ . Dla ułatwienia ustawiaj taką wartość napięcia na wejściu, przy którym wyświetlą się podane stany w tabeli 1. Wynik zapisz w pozycji  $U_I$ .

Tabela 1.  $U_{ref} = 5 \text{ V};$  (.....) ustaw  $U_{odn} = U_{ref}/2 = 2,5 \text{ V}.$  (.....)

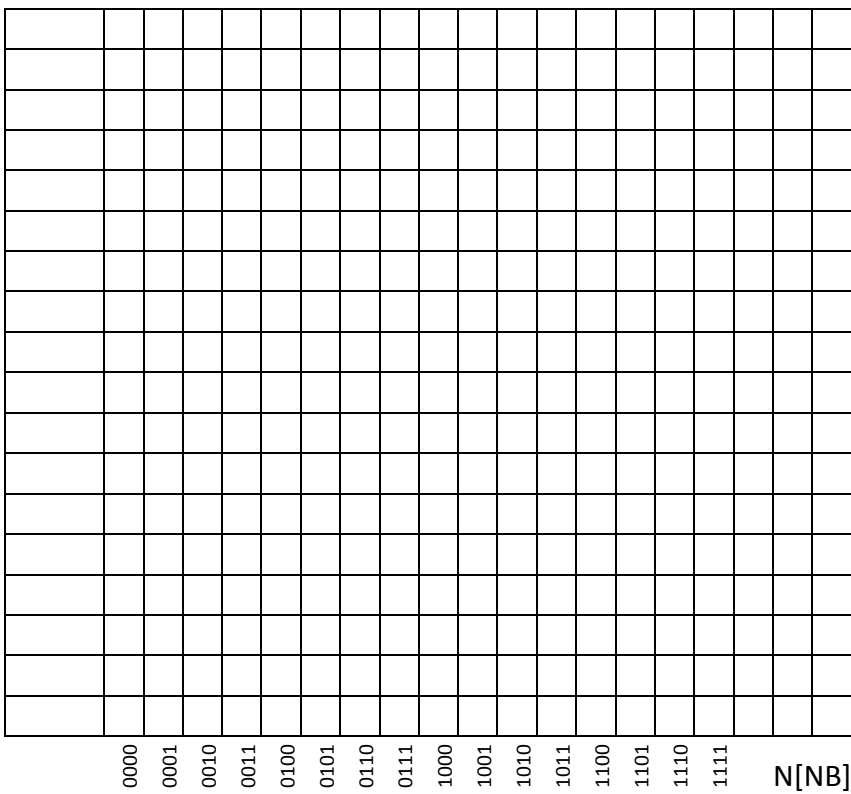
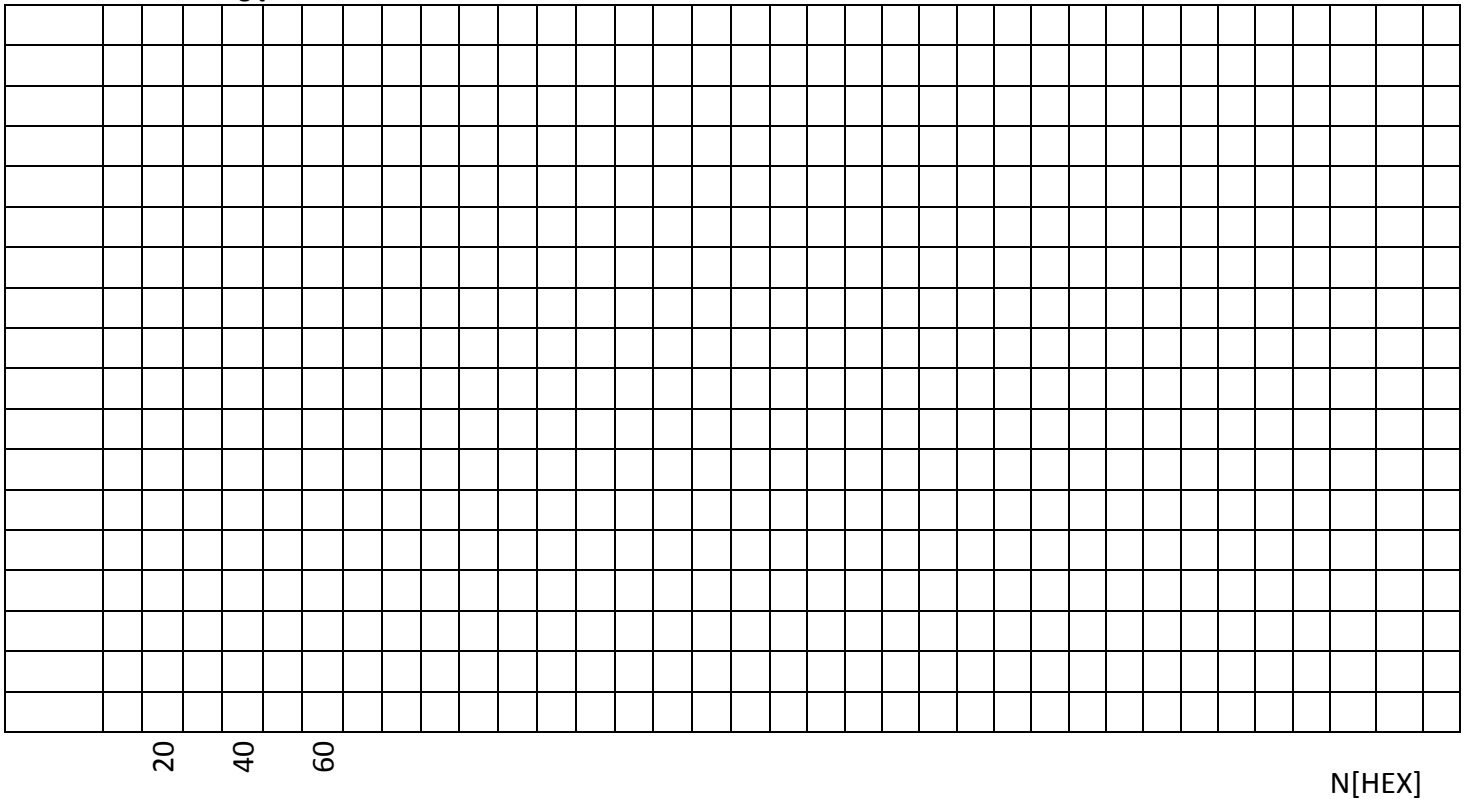
l.p.	HEX	DEC	N = Liczba BIN								a/c			c/a
			$a_7$	$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$U_I$	$U_{obl}$	błąd $\Delta U$	
			D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0				
1			0	0	0	0	0	0	0	0				
2			0	0	0	0	0	0	0	1				
3			0	0	0	0	0	0	1	0				
4			0	0	0	0	0	0	1	1				
5			0	0	0	0	0	1	0	0				
6			0	0	0	0	0	1	0	1				
7			0	0	0	0	0	1	1	0				
8			0	0	0	0	0	1	1	1				
9			0	0	0	0	1	0	0	0				
10			0	0	0	0	1	0	0	1				
11			0	0	0	0	1	0	1	0				
12			0	0	0	0	1	0	1	1				
13			0	0	0	0	1	1	0	0				
14			0	0	0	0	1	1	0	1				
15			0	0	0	0	1	1	1	0				
16			0	0	0	0	1	1	1	1				
17			0	0	0	1	0	0	0	0				
18			0	0	1	0	0	0	0	0				
19			0	1	0	0	0	0	0	0				
20			0	1	1	0	0	0	0	0				
21			1	0	0	0	0	0	0	0				
22			1	0	1	0	0	0	0	0				
23			1	1	0	0	0	0	0	0				
24			1	1	1	0	0	0	0	0				
25			1	1	1	1	0	0	0	0				
26			1	1	1	1	1	0	0	0				
27			1	1	1	1	1	1	0	1				
28			1	1	1	1	1	1	1	0				
29			1	1	1	1	1	1	1	1				





2. **Badanie przetwornika cyfrowo – analogowego DAC0800 (.....)**

- Pomiary do charakterystyki przejściowej przetwornika c/a (cyfrowo – analogowego):
  - ✓ ustawiając stany logiczne na wejściu przetwornika (  $D_7 \div D_0$  ) takie jak w *tabeli 1* odczytaj wartości napięcia wyjściowego przy zwartej zworze **J1**. Wyniki zanotuj w *tabeli 1* w kolumnie  $U_o$ .
- Narysuj charakterystyki  $U_o = f(N)$  :
  - ✓ dla stanów od 0 – 255 przyjmując rozdzielczość 32 (5 bitów),
  - ✓ drugą dla stanów od 0 – 16.



### 3. Wnioski:

#### Przetwornik analogowo - cyfrowy

##### 3.1. Omów:

- pojęcie przetwarzanie analogowo-cyfrowe
- etapy przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy (próbkowanie, dyskretyzacja, kwantyzacja, kodowanie)
- od czego zależy dokładność przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy
- jaka metoda przetwarzania została zastosowana w badanym przetworniku A/C (**ADC0804**)
- zestaw podstawowe parametry badanego przetwornika A/C:
  - ✓ rozdzielczość,
  - ✓ rozdzielczość względna
  - ✓ błąd kwantyzacji
  - ✓ dokładność bezwzględna
  - ✓ dokładność względna
- oblicz rozdzielczość i rozdzielczość względną dla przetwornika 10 bitowego jeżeli nominalny pełny zakres przetwarzania  $U_{FS} = 10,24[V]$

#### Przetwornik cyfrowo analogowy

##### 3.2. Omów:

- pojęcie przetwarzanie cyfrowo - analogowe
- jak zbudowany jest badany przetwornik C/A (**DAC0800**)
- zestaw podstawowe parametry badanego przetwornika C/A:
  - ✓ rozdzielczość w [mV] i w [%]
  - ✓ nieliniowość
  - ✓ błąd bezwzględny
  - ✓ błąd względny