

Kraków 2019

Przetwornik analogowo-cyfrowy,
zbudowany w oparciu o przetwornik
cyfrowo-analogowy.

Jan Grodecki

(wersja poprawiona 2019)

Łukasz Kaczmarek*

Dominik Korecki*

Seweryn Ściążko*

(*wersja oryginalna 2006)

Spis Treści:

| | |
|---|----|
| 0. Spis treści..... | 2 |
| 1. Wstęp..... | 3 |
| 1.1 Co to za ćwiczenie co to za układ?..... | 3 |
| 1.2 Gdzie stosujemy przetworniki A/C?..... | 3 |
| 1.3 Jak działają przetworniki A/C?..... | 4 |
| 2. Idea systemu pomiarowego..... | 5 |
| 3. Opis układu..... | 6 |
| 3.1 Schemat układu..... | 6 |
| 3.2 Opis głównych elementów układu..... | 7 |
| 3.3 Serce układu czyli przetwornik C/A..... | 8 |
| 3.4 Opis działania układu..... | 10 |
| 4. Zasada działania przetwornika SAR..... | 11 |
| 5. Ćwiczenia..... | 13 |
| 5. Wnioski..... | 14 |

1. Wstęp

1.1 Co to za ćwiczenie, co to za układ?

Celem ćwiczenia jest pomoc w zrozumieniu budowy, zasady działania oraz roli przetworników analogowo-cyfrowych we współczesnym świecie. Na przykładzie prostego układu pokażemy możliwe zastosowania przetwornika A/C oraz wyjaśnimy jego funkcję w procesie pomiarowym. Dokonamy również pomiaru temperatury, korzystając z innych znajdujących się na pracowni układów.

Układ przetwornika analogowo-cyfrowego umożliwia zamianę informacji o podanej wielkości fizycznej, z postaci analogowej (ciągłej) na postać cyfrową (skwantowaną).

Zamiany takiej chcemy najczęściej dokonać po to by uchronić tą informację przed zakłóceniami, które mogą ją zniekształcić w trakcie zapisu, lub przesyłaniu metodą analogową. Informację musimy zamienić na postać cyfrową również wtedy, gdy chcemy dokonać jakiegokolwiek obróbki przy pomocy komputera.

Sygnal analogowy, czy to zapisywany na taśmie magnetofonowej, czy przesyłany drogą radiową zawsze narażony jest na zakłócenia, występujące w postaci szumów, co wiąże się z utratą części informacji.

Analogowa kopia kopii kasety magnetofonowej z nagraniem muzyką jest dużo gorszej jakości niż oryginał, ponieważ informacja zapisywana na każdej kolejnej kopii ulega coraz większej degradacji z powodu niedoskonałości urządzeń analogowych i wszechobecnych szumów. Słuchając audycji radiowej nadawanej z radiostacji oddalonej od nas o 200km trudno jest uzyskać wysoką jakość odbioru, ponieważ wartość odbieranego sygnału radiowego może być na poziomie szumów.

W przypadku nagrań cyfrowych, powyższe problemy nie istnieją. Każda kopia pliku audio z nagraniem muzyką brzmi dokładnie tak samo, jak plik źródłowy. Jakość odbioru cyfrowego radia internetowego oddalonego o tysiące kilometrów jest taka sama, jak w samej rozgłośni (oczywiście pod warunkiem stabilnego połączenia internetowego).

System cyfrowy chroni przesyłaną lub zapisywaną informację przed zakłóceniami, poprzez zastosowanie mechanizmów kontroli i korekcji błędów, jak na przykład kontroli parzystości, wszelkich kodów transmisyjnych, itd.

Badany w tym ćwiczeniu układ umożliwia pomiar napięcia elektrycznego i podanie wyniku w postaci cyfrowej, dzięki czemu wynik ten może być przesłany cyfrowym kanałem transmisyjnym, następnie umieszczony w pamięci komputera, przetworzony i/ lub zapisany do późniejszej obróbki.

1.2 Gdzie stosujemy przetworniki A/C?

Układy przetwarzające sygnały analogowe na cyfrowe znajdują coraz więcej zastosowań oraz są one tanie w produkcji masowej. Szybkie przetworniki A/C są obecnie coraz powszechniej stosowane w różnych dziedzinach elektroniki, między innymi w analizie sygnałów telewizyjnych, radarowych, transmisji kodowej, układach rejestracji i analizy przebiegów elektrycznych. Mają one zastosowanie również w urządzeniach telekomunikacyjnych oraz przyrządach pomiarowych.

1.3 Jak działają przetworniki A/C

Proces przetwarzania analogowo-cyfrowego składa się z 3 podstawowych operacji:

Próbkowania - które polega na pobieraniu co pewien (określony i jednakowy) czas T próbki sygnału analogowego i rejestrowaniu chwilowych wartości pobranych próbek.

Kwantowania - czyli podzieleniu ciągłego zbioru wartości sygnału na skończoną liczbę ściśle określonych, sąsiadujących ze sobą, przedziałów i ustaleniu tzw. poziomów kwantowania, czyli określonych wartości z każdego przedziału reprezentujących wszystkie wartości znajdujące się w tym przedziale. Każdej próbce przypisuje się odpowiedni (najbliższy) poziom kwantowania, a następnie w procesie...

Kodowania przyporządkowuje mu się zakodowaną liczbę - zatem każdej próbce sygnału analogowego odpowiada słowo kodowe stanowiące cyfrowy zapis określonego poziomu kwantowania.

Stosujemy wiele podziałów metod przetwarzania analogowego-cyfrowego:

W zależności od zasady przetwarzania:

Metody bezpośrednie - w układach opartych na metodach bezpośrednich następuje od razu porównanie wielkości przetwarzanej z wielkością odniesienia. Do tej grupy zaliczają się przetworniki z bezpośrednim porównaniem oraz przetworniki kompensacyjne.

Metody pośrednie - najpierw odbywa się zamiana wielkości przetwarzanej na pewną wielkość pomocniczą (np. czas lub częstotliwość), porównywaną następnie z wielkością odniesienia.

W zależności od rodzaju wielkości pomocniczej:

Metoda częstotliwościowa

Metoda czasowa (prosta lub z podwójnym całkowaniem).

W zależności od czasu, w którym odbywa się przetwarzanie:

Metody chwilowe - wynik przetwarzania odpowiada wartości sygnału w pewnej chwili znacznie krótszej od okresu, w którym zachodzi przetwarzanie. Do metod chwilowych należy np. metoda bezpośredniego porównania, metoda kompensacyjna oraz metoda czasowo prosta

Metody integracyjne - wynik przetwarzania odpowiada średniej wartości sygnału w okresie integracji, zajmującym na ogół znaczną część okresu przetwarzania. Do metod integracyjnych zalicza się między innymi metodę czasową z podwójnym całkowaniem oraz metodę częstotliwościową.

2. Idea systemu pomiarowego

Badany w trakcie tego ćwiczenia układ jest częścią większego systemu pomiarowego, który zostanie teraz krótko opisany.

System ten składa się z:

- Czujnika – układu mającego bezpośrednią styczność z badaną wielkością fizyczną, przetwarzającego ją na napięcie elektryczne.
- Przetwornika AC – układu przetwarzającego to napięcie na wartość cyfrową, będącego przedmiotem tego ćwiczenia.
- Przystawki do komputera PC – układu umożliwiającego sterowanie przetwornikiem AC przy pomocy komputera, oraz przesyłanie wyników pomiarów do komputera.

Czujnik, w naszym przypadku termometr diodowy, mierzy wielkość fizyczną jaką jest temperatura i korzystając z pewnych właściwości diody półprzewodnikowej zamienia tą wielkość na napięcie elektryczne, przekazywane do dalszej części układu.

Przetwornik AC przetwarza poziom napięcia na postać cyfrową, dzięki czemu mając do dyspozycji kolejne elementy układu, możemy poddać tą informację dalszej obróbce.

Przystawka do komputera PC umożliwia komunikację komputera z układem oraz przekazanie informacji o mierzonej wielkości fizycznej do komputera PC.

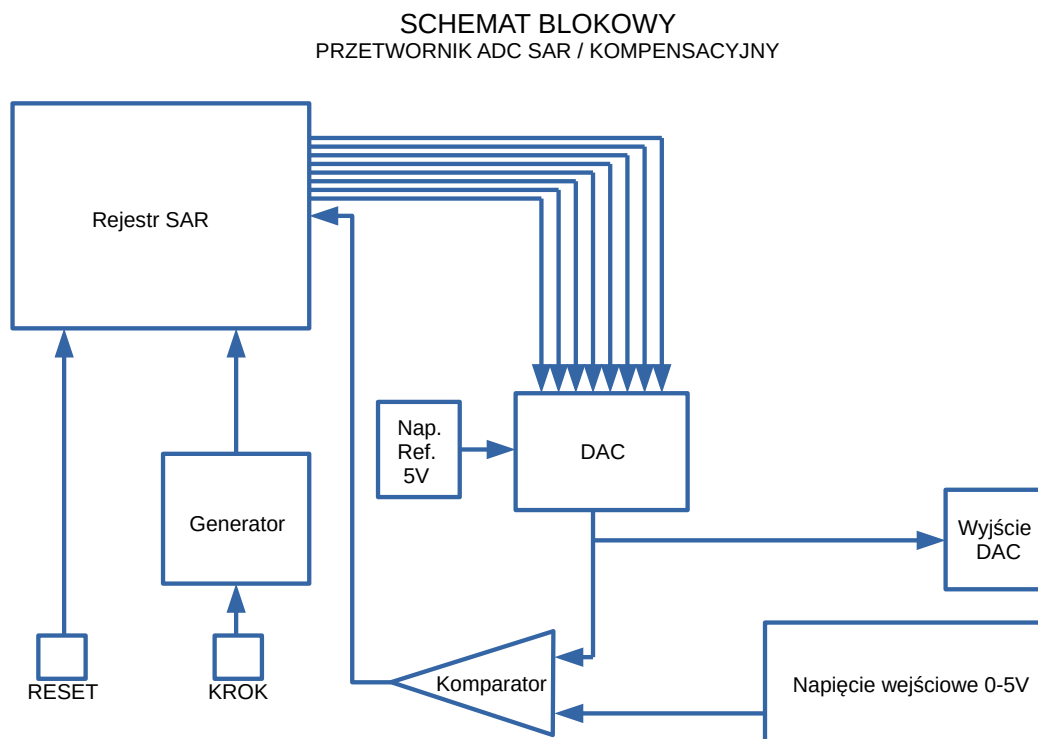
Dwie ostatnie części układu pomiarowego nazywa się często systemem akwizycji danych (DAQ).

3. Opis naszego układu

3.1 Schemat układu

Szczegółowy schemat układu którym będziemy się zajmować znajduje się w załączniku A na końcu tej instrukcji.

Z powodu ograniczonej rozdzielczości nie wszystkie elementy są na min dobrze widoczne. Pozwala on jednak ocenić złożoność problemu jakim jest stworzenie przetwornika A/C na podstawie przetwornika C/A. Dla naszych rozważań wystarczy dużo prostszy schemat ogólny na którym oznaczone są tylko najważniejsze elementy, które w zupełności wystarczą aby prawidłowo zrozumieć ideę działania naszego układu.



Na powyższym rysunku został przedstawiony schemat ogólny naszego przetwornika A/C opartego na przetworniku C/A.

Na schemacie wyraźnie widać podstawowe elementy układu czyli:

- Przetwornik C/A (DAC)
- Komparator
- Rejestr SAR
- Licznik właściwy podawany na wejście C/A
- Generator sygnału zegarowego
- Wyjście na wyświetlacz
- Wyjście przetwornika C/A na oscyloskop

W układzie występują również zworki do wyboru pomiędzy **licznikiem** / **rejestrem SAR**, oraz do wybrania częstotliwości zegara naszego przetwornika (**Z1, Z2, Z3, KROK**).

3.2 Opis głównych elementów układu:

Przetwornik C/A jest jedną z najważniejszych części w układzie i wraz z komparatorem tworzy serce układu. Przetwarza sygnał podawany przez licznik w postaci cyfrowej na postać analogową i wysyła go do komparatora. Ma możliwość pobrania napięcia wzorcowego, w zależności od którego podaje wartość na wyjściu. Napięcie wzorcowe definiuje zakres pomiaru.

Komparator - jego działanie polega na porównywaniu napięcia podawanego z przetwornika C/A z napięciem źródła. W przypadku kiedy napięcie z komparatora będzie większe lub równe napięciu źródła, komparator zatrzyma generator zegara, a tym samym zatrzyma licznik. Oznaczać to będzie, że pomiar został zakończony. Aby ponownie dokonać pomiaru należy zresetować licznik przyciskiem RESET.

Generator sygnału zegarowego składa się z 2 części:

- Właściwego generatora sygnału
- Licznika, który pozwala uzyskać sygnały o różnych częstotliwościach

Wybór wyjścia licznika wykonywany jest za pomocą zworek.

Licznik do momentu zatrzymania generatora przez komparator podaje na wejścia przetwornika C/A kolejne wartości z zakresu 0-255, przekazywane są one również na wyjście wyświetlacza.

Wyjście na wyświetlacz umożliwia podgląd tego, co jest podawane na wejście przetwornika C/A, oraz sprawdzenie poprawności pomiaru na woltomierzu wbudowanym w wyświetlacz.

Wyjście na oscyloskop pozwala na podgląd tego, co pojawia się na wyjściu przetwornika C/A

Wejście/Wyjście pozwala na odczytywanie danych z wejścia przetwornika C/A. Pozwala zadawanie wartości binarnej na wejściu przetwornika C/A.

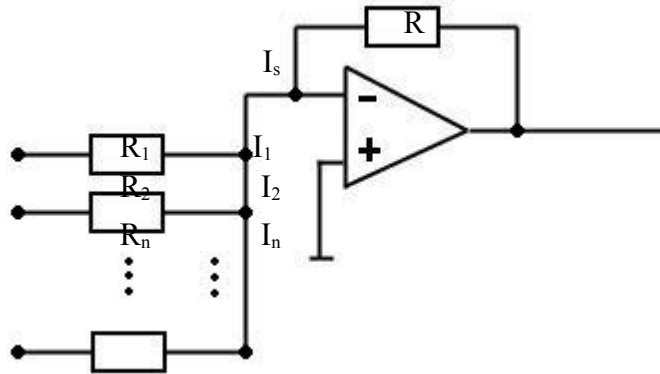
Wybór trybu pracy pomiędzy kompensacyjnym a SAR dokonywany jest za pomocą zworki umieszczonej centralnie na środku płytki.

3.3 Serce układu czyli przetwornik C/A

Główną częścią na której został oparty nasz układ jest przetwornik C/A.

Aby zrozumieć jak działa przetwornik A/C którego używamy, konieczne jest dobre zrozumienie działania właśnie tej części - dlatego też poświęcony jest jej osobny rozdział.

Przetwornik C/A to tak naprawdę sumator z wagami i odpowiednim wyskalowaniem. W dużym uproszczeniu jego schemat w ogólnym przypadku n-bitów wejściowych wygląda następująco:



Na każdą z linii od 1 do n podawany jest sygnał +U bądź 0 w zależności czy na danym wejściu cyfrowym pojawia się 0 czy 1. Oporniki spełniają zależność: $\frac{R_n}{R_{n+1}} = 2$

Ponieważ napięcie na zaciskach wzmacniacza operacyjnego dąży do 0 dzięki sprzężeniu

zwrotnemu to $I_n = \frac{b_n * U}{R_n}$, a $I_s = \sum_{n=1}^n I_n$ (b_n oznacza czy na danej linii jest 0 czy 1).

Wiadomo, że opór na wejściu do wzmacniacza dąży do nieskończoności (jest rzędu setek MΩ), dlatego cały prąd popłynie przez opornik R, a co za tym idzie możemy w łatwy sposób

policzyć napięcie wyjściowe $U_{wy} = -U * R * \sum_{n=1}^n \frac{b_n}{R_n}$.

Znając zależność między oporami możemy zapisać że:

$$R_n = \frac{1}{2^{n-1}} * R_1$$

Podstawiając to do naszego wzoru na napięcie otrzymujemy:

$$U_{wy} = -U * \frac{R}{R_1} * \sum_{n=1}^n b_n * 2^{n-1}$$

Teraz zastanówmy się jak dobrać R aby przy $b_n=1$ (czyli samych 1) otrzymać napięcie wyjściowe -U.

Wyrażenie przyjmuje wtedy postać:

$$U_{wy} = -U * \frac{R}{R_1} * \sum_{n=1}^n 2^{n-1}$$

Łatwo zauważyć że sumujemy ciąg geometryczny, a więc

$$U_{wy} = -U * \frac{R}{R_1} * \frac{2^n - 1}{2 - 1} = -U * \frac{R}{R_1} * (2^n - 1)$$

W naszym przypadku $n=8$ z czego wynika zależność że $R = R_1 * \frac{1}{255}$

Czyli po podstawieniu do wzoru na U wyjściowe:

$$U_{wy} = -U * \frac{1}{255} * \sum_{n=1}^8 b_n * 2^{n-1}, \text{ gdzie } b_1 \text{ jest najmniej znaczącym bitem, np: wartość}$$

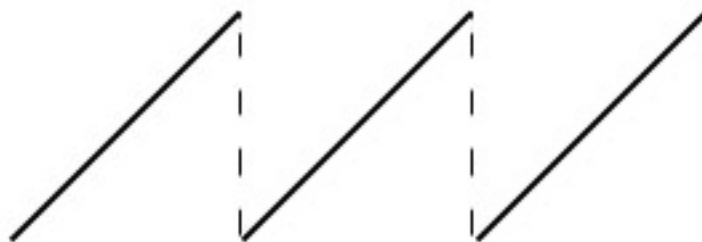
podawana przez licznik na wejście przetwornika C/A wynosi 8 (co odpowiada $b_5=1$ i $b_7=1$)

$$U_{wy} = -U * \frac{1}{255} * (2^4 + 2^6) = -U * \frac{80}{255} \text{ czyli uzyskaliśmy dokładnie taką część napięcia}$$

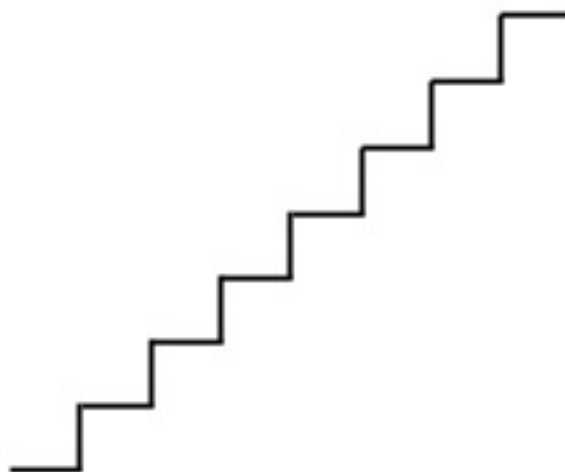
referencyjnego jaką chcieliśmy otrzymać.

Napięcie na wyjściu przetwornika C/A można oglądać dzięki wyjściu na oscyloskop. Jeśli wejście dla mierzonego sygnału będzie odłączone bądź podamy na nie napięcie większe od referencyjnego, licznik będzie działał w nieskończoność odliczając od 0-255, a my będziemy mogli dokładnie zbadać przebiegi jakie pojawiają się na wyjściu.

W oddaleniu powinniśmy zobaczyć przebieg piłokształtny:



Jeśli przyjrzymy się przebiegom z bliska możemy zaobserwować charakterystyczne ząbki, dzięki którym można wyznaczyć zarówno częstotliwość działania układu jak też skok napięcia między poszczególnymi liczbami, czyli skalę (zakres) działania.



Przetwornik C/A wykorzystany w układzie jest jego najważniejszą częścią, a więc przed przystąpieniem do wszelkich ćwiczeń należy dokładnie zapoznać się z przedstawionym wstępem teoretycznym na jego temat.

3.4 Opis działania układu

Układ służy do przetwarzania sygnału analogowego na postać cyfrową.

Warunki początkowe pomiaru:

- Na wejście nie jest podawane żadne napięcie
- Generator jest zatrzymany
- Licznik jest ustawiony na 0
- Na wyjściu przetwornika C/A napięcie wynosi 0V
- Ustalono jest źródło napięcia, częstotliwość działania układu, oraz zakres pomiaru

Jak dokonywany jest pomiar:

- Na wejściu pojawia się napięcie które chcemy zmierzyć
- Jeśli jest ono większe od napięcia podawanego z przetwornika C/A komparator uruchamia generator, który z kolei uruchamia licznik
- Licznik zwiększa swoją wartość o 1
- Przetwornik C/A przetwarza nową wartość z licznika i podaje ją na komparator
- Jeśli wartość podana z przetwornika C/A przewyższy wartość ze źródła napięcia, generator zostaje zatrzymany i pomiar zakończony, jeśli nie – wracamy do punktu w którym licznik zwiększa swoją wartość o 1
- Wynik pomiaru można odczytać na wyświetlaczu podłączonym do przetwornika

Jak ustawić / skonfigurować układ:

- Aby wyzerować licznik należy nacisnąć przycisk RESET
- Aby wybrać jedną z 3 dostępnych częstotliwości lub tryb manualny (krokowy) należy ustawić zworkę generatora w żadaną przez nas pozycję.

4. Zasada działania przetworników SAR

Przetworniki Analogowo Cyfrowe SAR (Successive Approximation Register) dokonują pomiaru sygnału analogowego wykorzystując metodę kolejnych aproksymacji (przybliżeń).

Polega ona na tym, że każdy kolejny pomiar jest bliższy rzeczywistej wartości sygnału. Przetworniki takie działają szybko oraz mają stały i znany czas przekształcania. Generują one wartości wykorzystując wagi kolejnych bitów w ciągu od najbardziej istotnego bitu (MSB - Most Significant Bit) do najmniej ważnego bitu (LSB - Least Significant Bit). Wartości kolejnych kroków są wynikiem poprzednich pomiarów, realizując algorytm drzewa binarnego.

Schemat działania algorytmu SAR wygląda następująco:

1. Wyczyścić rejestr SAR i ustawić DAC na 0.
2. Ustawić MSB przetwornika:
 - jeśli VDAC (napięcie testowe podawane przez przetwornik) jest większe od V_{in} , to ustawić ten bit na 0,
 - jeśli VDAC jest mniejsze od V_{in} (napięcie wejściowe), pozostawić bit na wartości 1.
3. Powtórzyć krok 2. dla następnego bitu do czasu aż wszystkie bity przetwornika zostaną sprawdzone i przetestowane.
4. Po wykonaniu wszystkich powtórzeń, wyjście cyfrowe przetwornika zawierać będzie wartość cyfrową sygnału wejściowego.

W naszym układzie napięcie referencyjne ma wartość 5V. Jest to kluczowa informacja ponieważ z tą właśnie wartością porównywane jest napięcie wejściowe (czyli to które chcemy zmierzyć - podając je na wejście naszego układu).

Jeżeli na wejściu podamy napięcie równe referencyjnemu czyli również 5V to w postaci cyfrowej otrzymamy 255, jeżeli napięcie wejściowe będzie wynosiło 2,5V to wartość cyfrowa wyniesie 128. Napięcie 1,25V to wartość 64, a w przypadku napięcia wejściowego 0V - wartość cyfrowa wyniesie 0. Reasumując – przy pomocy naszego układu napięcie podawane na wejście możemy zmierzyć z dokładnością do 1/256 w zakresie 0-5V.

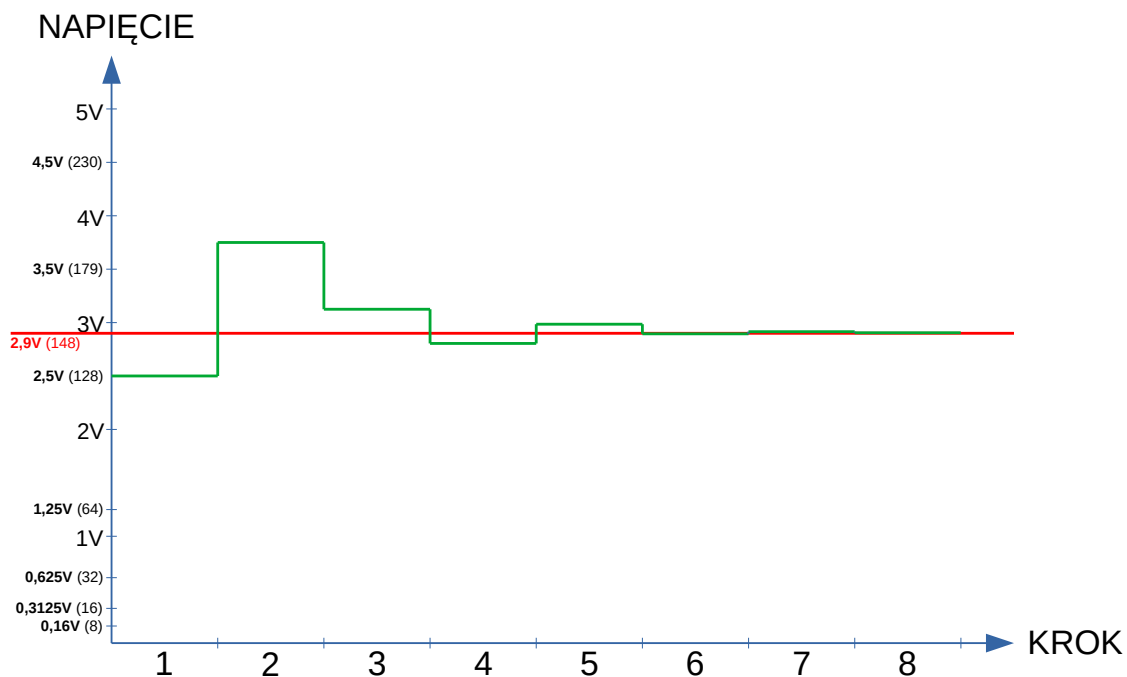
Aby jeszcze lepiej zrozumieć zasadę działania posłużymy się przykładem:

a) Przyjmijmy, że na wejście podamy napięcie 2,9V (wartość ta w postaci cyfrowej wyniesie 148, ale do tego dopiero dojdziemy krok po kroku). Algorytm w pierwszej kolejności sprawdza bit o najwyższej wadze (MSB) - który ma wartość 128 (odpowiada wartości napięcia 2,5V). Ponieważ wartość 2,5V (128) jest mniejsza niż 2,9V (148) to wartość tego bitu ustawiona zostanie na 1. Po pierwszym przebiegu wartość całego ciągu będzie wyglądała następująco: 1000 0000.

b) W kolejnym cyklu sprawdzany jest kolejny bit o najwyższej wadze, który ma wartość 64 (odpowiada wartości napięcia 1,25V). Układ dodaje $128+64=192$ ($2,5V + 1,25V = 3,75V$), a ponieważ wartość ta jest większa niż 148 (2,9V) to wartość bitu ustawiana jest na 0. Po drugim przebiegu wartość całego ciągu będzie wyglądała następująco: 1000 0000.

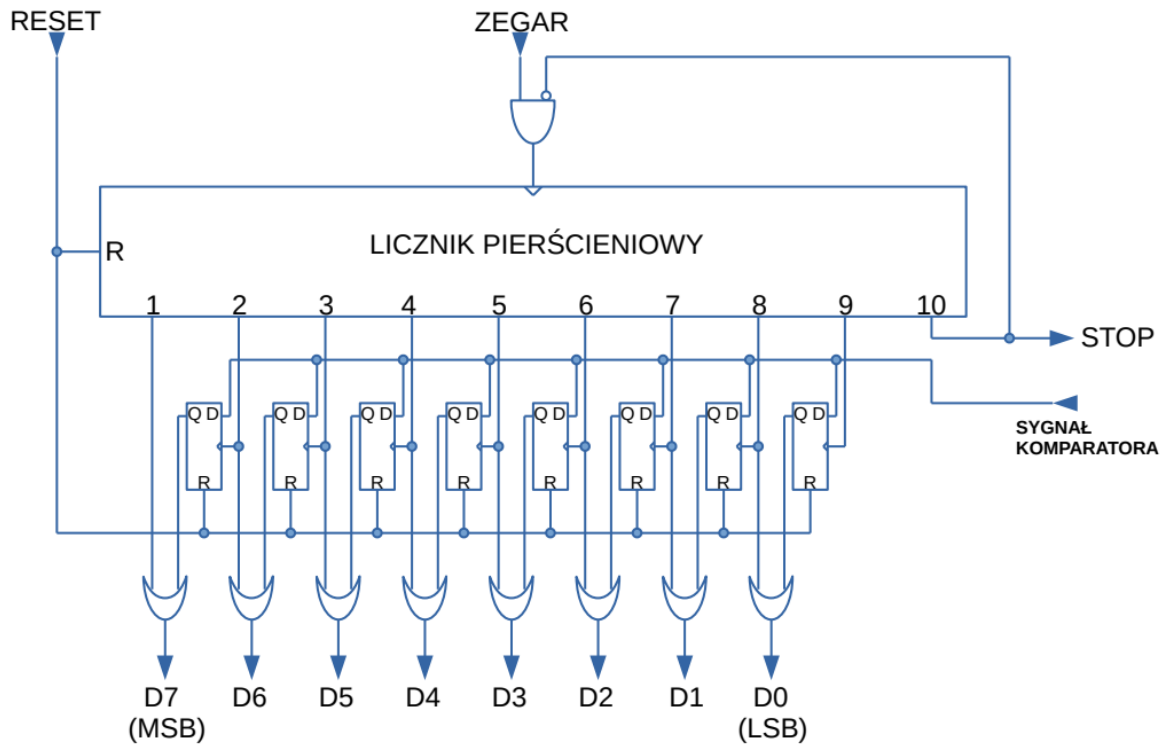
c) W następnym cyklu kolejny bit ma wartość 32 (0,625V), więc znów układ dodaje wartość $128+32=160$ ($2,5V + 0,625V = 3,125V$). Wartość ta jest większa od 148 (2,9V), więc wartość tego bitu także jest ustalana na 0. Ciąg pozostaje bez zmian i wynosi 1000 0000.

d) Kolejny cykl i badamy następny bit który przechowuje wartość 16 (0,3125V). Dodając $128+16=144$ ($2,5V + 0,3125V = 2,8125V$). Wartość ta jest mniejsza od wartości mierzonej więc bit ten zostaje ustalony na 1. Po 4 cyklach oszacowana wartość jest postaci 1001 0000. W następnych cyklach wykonywanych zgodnie z powyższym algorytmem wartość ciągu wyniesie 1001 0100.



Na powyższym wykresie przedstawiono kompletny cykl działania rejestru SAR składający się z 8 kroków. Na linii napięcia w nawiasach podano wartość bitową.

W ćwiczeniu zastosowano dyskretny rejestr SAR zbudowany z użyciem licznika pierścieniowego, ośmiu przerzutników typu D oraz ośmiu bramek OR.



Licznik pierścieniowy zapewnia impulsy taktujące przerzutniki oraz sygnał porównywany. Przerzutniki D zapamiętują wartość sygnału komparatora, a bramki OR sumują sygnał zapamiętany w przerzutnikach wraz z sygnałem porównywanym - generowanym przez licznik pierścieniowy. Sygnał z bramek OR podawany jest poprzez przełącznik na przetwornik DAC.

5. Ćwiczenia – czyli co można zrobić przy pomocy tego układu.

1. Ustalając najmniejszą możliwą częstotliwość pracy generatora podać przy pomocy potencjometru napięcie 3.72V i obserwować, jaka wartość zostanie przypisana temu poziomowi napięcia przez przetwornik.
 - 1.1. Zworkę regulacji częstotliwości ustawić w pozycji Z-2
 - 1.2. Manipulować potencjometrem P1 aż do uzyskania na wyświetlaczu woltomierza wartości 3.72V
 - 1.3. Zresetować licznik przyciskiem RESET
 - 1.4. Zanotować uzyskaną wartość cyfrową
 - 1.5. Zmierzyć napięcie na wyjściu przetwornika C/A przy pomocy oscyloskopu
 - 1.6. Sprawdzić czy uzyskaliśmy ten sam wynik

2. Ustalając w pozycji Z-2 częstotliwość pracy generatora podać przy pomocy potencjometru napięcie 0V, a następnie obserwując przy pomocy oscyloskopu poziom napięcia na wyjściu przetwornika C/A zwiększać napięcie podawane poprzez potencjometr. Zwrócić uwagę na skokową naturę zmian napięcia na wyjściu C/A. Wykonać przy pomocy markerów na oscyloskopie cyfrowym, pomiar wartości “skoku napięcia” na wyjściu C/A – jest to rozdzielczość napięciowa przetwornika A/C.
 - 2.1. Zworkę regulacji częstotliwości ustawić w pozycji Z-2
 - 2.2. Zresetować licznik przyciskiem RESET
 - 2.3. Manipulować potencjometrem do uzyskania skoku napięcia na wyjściu C/A
 - 2.4. Zmierzyć poziom napięcia na wyjściu C/A, następnie zwiększyć ostrożnie napięcie wejścia przy pomocy potencjometru, by uzyskać skok napięcia i ponownie zmierzyć poziom napięcia na wyjściu C/A. Uzyskaną wartość zanotować.

3. Ustawiając maksymalne napięcie przy pomocy potencjometru oraz częstotliwość pracy generatora w pozycji Z-2, zmierzyć ile czasu zabiera licznikowi przeliczenie od 0 do 255. Wiedząc, że częstotliwość generatora w pozycji Z-3 jest 8 razy większa od częstotliwości w pozycji Z-2, ustalić największą możliwą częstotliwość (Z-3). Wyznaczyć okres przebiegu dla takiej częstotliwości – jest to maksymalna możliwa do osiągnięcia rozdzielczość czasowa przetwornika AC.
 - 3.1. Zworkę regulacji częstotliwości ustawić w pozycji Z-2
 - 3.2. Ustawić maksymalne napięcie przy pomocy potencjometru
 - 3.3. Zresetować licznik, rozpoczynając pomiar czasu
 - 3.4. Kiedy licznik doliczy do 255, zatrzymać zegar
 - 3.5. Podzielić zmierzony czas przez 255 – otrzymujemy czas pomiędzy kolejnymi krokami licznika, a więc pomiędzy kolejnymi skokami napięcia na wyjściu przetwornika CA
 - 3.6. Odwrotność tego czasu to najmniejsza ustawialna częstotliwość pracy przetwornika.
 - 3.7. Jej 8 krotna wielokrotność, to największa ustawialna częstotliwość pracy przetwornika
 - 3.8. Odwrotność tej częstotliwości, to czas pomiędzy kolejnymi krokami licznika przy największej częstotliwości, a więc rozdzielczość czasowa przetwornika.

6. Wnioski.

Ze względu na cyfrową budowę współczesnych komputerów, jakakolwiek obróbka wyników pomiarów w postaci analogowej nie wchodzi w grę. Jedynym sposobem by umożliwić przeniesienie informacji ze świata analogowego do pamięci maszyny cyfrowej jest zamiana tej informacji na postać cyfrową. Do tego właśnie służą przetworniki analogowo-cyfrowe, z których jeden został tutaj zbadany i opisany. To urządzenie posiada oczywiście pewne ograniczenia – rozdzielczość napięciową i czasową. Nie możemy przy jego pomocy wykryć różnic napięć mniejszych niż pewna z góry ustalona wartość, ani też nie możemy zarejestrować skoków napięcia wejściowego o czasie trwania krótszym niż nasza rozdzielczość czasowa.