

Ćwiczenie nr 1

Metody wprowadzania informacji cyfrowej o wyniku pomiaru do komputera

Cel ćwiczenia: zapoznanie z podstawowymi typami przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz wyznaczaniem błędów statycznych i dynamicznych przetwarzania.

1. Wstęp

Przetwornik służy do zmiany jednej wielkości lub jej postaci w inną. Możemy także zmieniać wielkość w taką samą ale o innej wartości - takie przetworniki nazywamy przetwornikami skali. Najważniejsze jest aby przetwarzanie odbywało się w sposób jednoznaczny. W przypadku konieczności wprowadzenia informacji o sygnale elektrycznym do komputera lub systemu mikroprocesorowego należy przetworzyć wielkość analogową w postać cyfrową - dokładniej mówiąc w jej reprezentację liczbową w odpowiedniej postaci (binarnej, szesnastkowej lub też dziesiętnej). Dokonujemy tego za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego (ang. analog - digital converter w skrócie ADC). Wyprowadzając sygnał z komputera do układu należy go przetworzyć z wartości cyfrowej na analogową za pomocą przetwornika cyfrowo-analogowego (ang. digital-analog converter DAC).

2. Przetwornik cyfrowo-analogowy

Przetwornik cyfrowo-analogowy dokonuje zamiany dyskretnego sygnału cyfrowego na wartość elektryczną (napięcie lub prąd) zgodnie z zależnością:

$$U_{wy} = U_{ref} \sum_{i=1}^N a_i 2^{-i} \quad (1)$$

gdzie:

U_{ref} - napięcie odniesienia

a_i - bity 0 lub 1 pochodzące od kodu sygnału wejściowego od najbardziej znaczącego (MSB) do najmniej znaczącego (LSB)

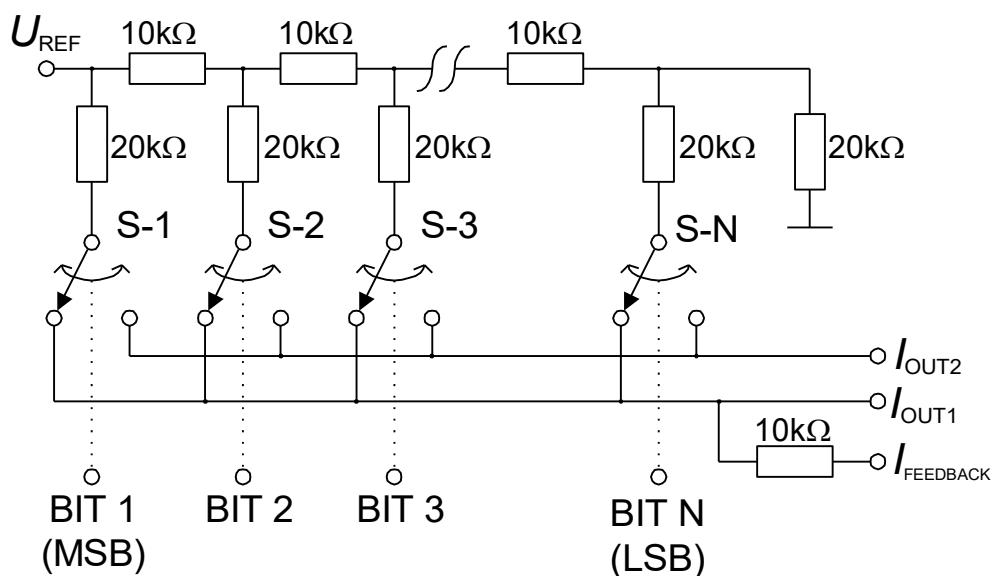
N - liczba bitów sygnału wejściowego

Możemy wyróżnić przetworniki z wyjściem unipolarnym w którym sygnał wyjściowy zmienia się w zakresie od 0 do U_{ref} i wyjściem bipolarnym dla sygnału zmieniającego się w zakresie od $-1/2U_{ref}$ do $+1/2U_{ref}$.

Ze względu na strukturę przetworniki możemy podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Przetworniki bezpośrednie polegają na bezpośrednim sterowaniu wejściowym kodem cyfrowym i sumowaniem na wyjściu poprzez wzmacniacz sumacyjny. W przetwornikach pośrednich sygnał cyfrowy zamieniany jest na inną postać np. liczbę impulsów o różnej szerokości a dopiero w następnym etapie na sygnał analogowy w postaci napięcia lub prądu.

Możemy dokonać podziału przetworników ze względu na sposób wprowadzania sygnału cyfrowego. W przetwornikach równoległych wszystkie bity równocześnie są podawane na wejście przetwornika, natomiast do przetwornika szeregowego wprowadzamy informację bit po bicie. Najczęściej stosowane są przetworniki równoległe.

Biorąc pod uwagę budowę wewnętrzną przetwornika możemy wyróżnić przetworniki z drabinką rezystorową o wartościach wagowych ($R-2R-4R$ itd.) lub też z siecią rezystorów $R-2R$. Przykład typowego przetwornika równoległego z siecią rezystorów $R-2R$ przedstawiony jest na rysunku 1. Jest to struktura układu AD7533 firmy Analog Devices.



Rys.1. Uproszczony schemat przetwornika C/A

3. Przetworniki analogowo-cyfrowe

Przetwornik analogowo-cyfrowy dostaje na wejście sygnał analogowy (najczęściej napięcie) i przetwarza go na zakodowaną postać cyfrową. Przetwarzanie A/C polega na przyporządkowaniu wartości napięcia wejściowego U_{we} odpowiedniej wartości kodu cyfrowego N_x w postaci stanów logicznych 0 lub 1.

Dla napięć unipolarnych możemy zapisać przybliżone równanie przetwarzania jako:

$$\frac{U_{we}}{U_{ref}} \approx \frac{N_x}{N} \quad (2)$$

gdzie:

U_{ref} - napięcie odniesienia

N - zakres przetwarzania równy wartości kodu odpowiadających ustawienie wszystkich bitów w stanie 1.

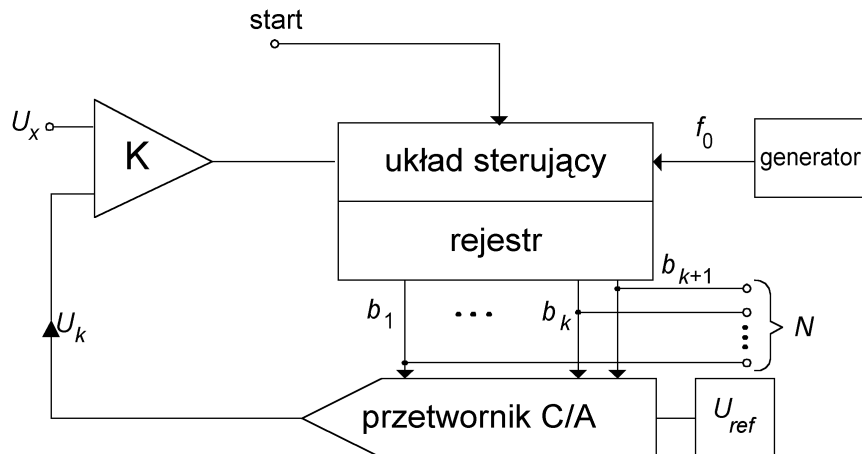
3.1 Przetwornik analogowo-cyfrowy z sukcesywną aproksymacją (kompensacji wagowej)

Działanie tego typu przetwornika polega na sukcesywnym równoważeniu napięcia przetwarzanego U_{we} napięciem wyjściowym U_k generowanym za pomocą przetwornika C/A doprowadzając stopniowo do tego aby $U_{we} - U_k = 0$. W praktyce różnica ta nie osiąga wartości 0 ze względu na skończoną rozdzielczość przetwornika. Schemat blokowy takiego przetwornika został przedstawiony na rysunku 2.

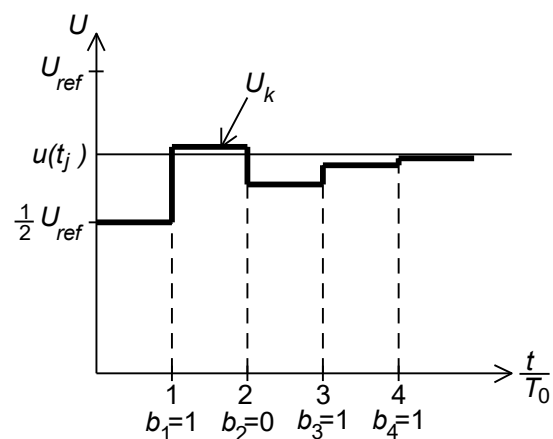
W przetworniku z sukcesywną aproksymacją napięcie wejściowe U_{we} jest porównywane z napięciem odniesienia zwiększonym kolejno o wartości wagowe $\frac{U_{ref}}{2}, \frac{U_{ref}}{4}, \frac{U_{ref}}{8}$, itd. Jeżeli

napięcie wejściowe U_{we} jest większe od kolejnej wartości wagowej to ustawiany jest dany bit w stanie 1 a jeżeli jest mniejsze to ustawiamy bit w stanie 0 po czym przechodzimy do kolejnego porównania z następną załączoną wartością wagową. Przebieg procesu

przetwarzania przedstawia rysunek 3. Bity będą ułożone w kolejności od najbardziej znaczącego MSB do najmniej znaczącego LSB. Po wykorzystaniu pełnej rozdzielczości przetwornika zwykle okazuje się, że pozostaje niewielka wartość napięcia, której nie jesteśmy w stanie zrównoważyć - jest to konsekwencja błędu kwantowania.



Rys.2. Uproszczony schemat przetwornika A/C z sukcesywną aproksymacją



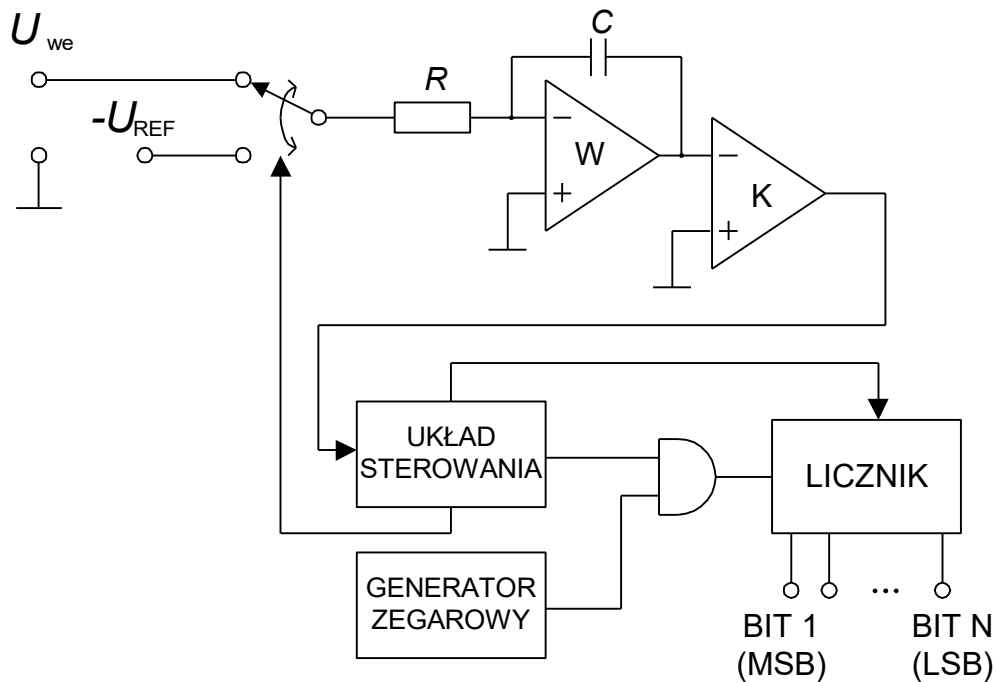
Rys.3. Przebieg procesu przetwarzania A/C w przetworniku z sukcesywną aproksymacją

W przetworniku z sukcesywną aproksymacją trzeba zadbać o to, aby napięcie przetwarzane nie ulegało zmianie przez cały czas przetwarzania - w przeciwnym razie kolejne wartości napięć wagowych będą porównywane z inną wartością napięcia wejściowego, co będzie prowadzić do trudnego w określeniu błędu przetwarzania. Aby uniknąć zmian napięcia wejściowego w czasie pracy przetwornika, stosuje się na jego wejściu przetwornik próbkująco-pamiętający.

3.2 Przetwornik analogowo-cyfrowy z podwójnym całkowaniem

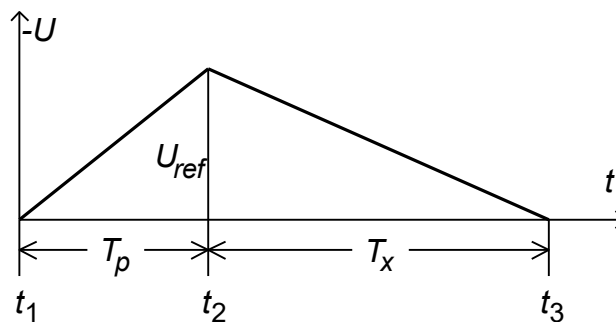
W metodzie tej ładujemy kondensator C przez określony czas prądem, którego natężenie jest proporcjonalne do wartości napięcia wejściowego. W drugim etapie kondensator jest rozładowywany prądem o stałej wartości do 0. Czas rozładowania kondensatora jest proporcjonalny do wartości napięcia wejściowego i zliczane są w tym czasie w liczniku

impulsy generatora zegarowego. Uproszczony schemat blokowy przetwornika z podwójnym całkowaniem przestawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy przetwornika z podwójnym całkowaniem

Przebieg napięcia podawanego na wejście komparatora w czasie pełnego cyklu pracy przetwornika z podwójnym całkowaniem pokazany jest na rysunku 5.



Rys. 5. Przebieg napięcia na wejściu komparatora w czasie pracy przetwornika z podwójnym całkowaniem

Możemy napisać równanie bilansu ładunku na integratorze:

$$\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_{we} dt = \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} U_{ref} dt \quad (3)$$

Po uproszczeniach i podstawieniu T_p i T_x otrzymujemy równanie bilansu:

$$\int_0^{T_p} U_{we} dt = \int_0^{T_x} U_{ref} dt \quad (4)$$

które po wykonaniu całkowania będzie miało postać:

$$U_x T_p = U_{ref} T_x \quad (5)$$

Czas całkowania napięcia wzorcowego opisuje równanie:

$$T_x = T_p \frac{U_x}{U_{ref}} \quad (6)$$

przy czym wartości T_p i U_{ref} są ustalone. Wynika z tego, że czas T_x wyznaczony na podstawie liczby impulsów zliczonej przez licznik jest proporcjonalny do wartości napięcia wejściowego.

Przetwornik z podwójnym całkowaniem jest przetwornikiem uśredniającym więc zmiany napięcia wejściowego U_x w czasie całkowania T_p zostają uśrednione. Jeżeli mamy do czynienia ze zmiennym przebiegiem zakłócającym to w przypadku, gdy jego okres jest równy czasowi całkowania T_p to takie zakłócenie zostanie skutecznie wytłumione. Wykorzystując tą zaletę buduje się przetworniki o dobranym czasie całkowania tak aby wytłumiały przebieg o częstotliwości sieciowej 50Hz (lub też 60Hz w USA i Japonii). Wadą tego przetwornika jest długi czas przetwarzania. Porównanie obu typów przetworników analogowo-cyfrowych zostało przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie przetworników A/C z podwójnym całkowaniem (Dual Slope) i z sukcesywną aproksymacją (Successive Approximation)

metoda	podwójne całkowanie	sukcesywna aproksymacja
szybkość	niska (1-10 próbek/s)	wysoka (10-10 ⁵ próbek/s)
rozdzielczość	wysoka (3-6 cyfr, 10-20 bitów)	średnia (8-16 bitów)
niedokładność	bardzo dobra (mniejsza niż 0,01%)	dobra (typowo 0,1%)
tłumienie zakłóceń	bardzo dobre (uśrednianie -całkowanie U_x)	brak - konieczna wcześniejsza filtracja
typowe zastosowanie	multimetry cyfrowe (DMM)	cyfrowe przetwarzanie sygnału (DSP)

4 Błędy przetwarzania cyfrowo-analogowego i analogowo-cyfrowego

Błąd przetwarzania cyfrowo-analogowego możemy wyrazić zależnością:

$$\Delta U_{wy} = \Delta U_{ref} + \Delta U_{ins} \quad (2)$$

gdzie:

ΔU_{ref} - błąd napięcia odniesienia

ΔU_{ins} - błąd instrumentalny

Na błąd instrumentalny składają się:

- błąd zera polegający na przesunięciu charakterystyki rzeczywistej w punkcie 0, prosta zamiast równania $y=ax$ ma równanie $y=ax+b$,
- błąd skali polega na złym kącie nachylenia charakterystyki względem charakterystyki idealnej - wartości są zawyżane lub zaniżane względem rzeczywistych,

- błąd nieliniowości powodujący odchylenie charakterystyki przetwarzania od liniowej, wyraża się go jako stosunek maksymalnego odchylenia do maksymalnej wartości dopasowywanej
- błąd niemonotoniczności przetwarzania, poszczególne punkty nie leżą na idealnej charakterystyce przetwarzania tylko nad lub pod nią.

W przypadku przetwarzania analogowo-cyfrowego błąd przetwarzania możemy określać podobnie:

$$\Delta U_{wy} = \Delta U_{ref} + \Delta U_{kw} + \Delta U_{ins} \quad (4)$$

gdzie dodatkowo ΔU_{kw} oznacza błąd kwantowania polegający na tym, że wartość mierzona jest zaokrąglana do wartości wynikającej z rozdzielczości przetwornika.

5 Wykonanie ćwiczenia

5.1. Opis stanowiska

Na stanowisku dostępny jest model 8 bitowego przetwornika cyfrowo-analogowego z napięciem referencyjnym 10V. Model ten może pracować w trybie ręcznego zdawania wartości wejściowej za pomocą przełączników umieszczonych na płycie górnej (opisanych D0 ... D7) lub też po dołączeniu karty pomiarowej USB-6009 za pomocą wyjść cyfrowych (port 0 linie odpowiednio od D0 do D7). Przetwornik ten może pracować samodzielnie (przełącznik trybu pracy w pozycji DAC) i napięcie z jego wyjścia jest dostępne na styku oznaczonym F, lub może być użyty jako część przetwornika analogowo-cyfrowego (przełącznik w pozycji ADC). Po wybraniu trybu pracy ADC wyjście przetwornika cyfrowo-analogowego łączone jest z jednym z wejść komparatora. Na drugie wejście komparatora dołączane jest napięcie mierzone, którego wartość można regulować za pomocą potencjometru umieszczonego na bocznej krawędzi modelu. Stan wyjścia komparatora jest sygnalizowany zaświeceniem diody LED ($U_1 < U_2$, gdzie U_1 to napięcie mierzone a U_2 to napięcie z przetwornika cyfrowo-analogowego) lub jej zgaszeniem ($U_1 \geq U_2$). W przypadku podłączenia karty pomiarowej sygnał stanu komparatora podawany jest na linię 0 portu 1 karty pomiarowej.

5.2. Badanie przetwornika cyfrowo-analogowego

Należy utworzyć aplikację umożliwiającą ciągłe zadawanie stanu bitów sterujących D0 ... D7 z panelu operatora (Front Panel). Obsługę karty pomiarowej przeprowadza się z użyciem kreatora DAQ Assistant pobranego z biblioteki Express>Input (lub Output). Po uruchomieniu kreatora należy wybrać opcję zadawania sygnału (Generate Signal) i następnie cyfrowe porty wyjściowe (Digital I/O Line Output). Zaznaczamy wszystkie linie portu 0 (w oknie Supported Physical Channels) i naciskamy klawisz Finish. Pojawi się okno z nazwami linii (Digital Out 0 ... 7). Należy zmienić nazwy na odpowiadające fizycznym bitom D0 ... D7. Zmiany dokonujemy po wciśnięciu prawego klawisza myszy na nazwie i wybraniu opcji Rename. Należy za pomocą opcji Details sprawdzić czy kolejność dodawania kanałów nie została przez przypadek zamieniona. W oknie odpowiadającym za ilość wykonywanych operacji (Task timing) należy wybrać opcję wysyłania jednego bajtu na żądanie (1 Sample on Demand). Po wykonaniu konfiguracji zamykamy kreatora poprzez naciśnięcie OK. Na schemacie blokowym obsługa wyjścia karty jest reprezentowana za pomocą bloku o nazwie DAQ Assistant z wejściem Data typu boolean (kolor zielony).

Do wejścia Data należy dołączyć zmienną sterującą w postaci tablicy ośmiu stanów logicznych odpowiadającym bitom D0 ... D7. Najprościej wykonuje się to poprzez najechanie kursorem na wejście data i otwarcie prawym klawiszem myszy menu, gdzie

wyberamy opcję Create control. Automatycznie utworzy się zadajnik w postaci tablicy stanów logicznych. Zaznaczając (na Front Panel) odpowiedni element możemy zmieniać stan bitu z 0 na 1 (zaznaczenie lub zaświecenie lampki na zielono oznacza stan 1, odznaczenie lub zgaszenie lampki – czarna – oznacza stan 0). Blok DAQ Assistant oczekuje na wejściu tablicy posiadającej osiem elementów, dlatego należy na panelu zadajnik rozciągnąć aby było widoczne osiem bitów (od D0 do D7) i uaktywnić tablicę zaznaczając (lub załączając) ostatni element i odznaczając go (wyłączając go).

Dodać element umożliwiający opóźnienie od 0,2 sekundy, tak aby stan wejścia był odświeżany co zadany czas. Ustawione na schemacie elementy otoczyć strukturą While loop i dodać klawisz umożliwiający zatrzymanie działania pętli.

Uruchomić program w tryb działania. Sprawdzić jakie wartości napięć (woltomierz dołączony do wyjścia F w modelu, przełącznik trybu pracy w pozycji DAC) odpowiadają poszczególnym bitom. Zanotować wartości napięć i porównać do napięcia referencyjnego. Sprawdzić jaka wartość napięcia otrzymywana jest po załączeniu więcej niż jednego bitu. Wysnuć i zanotować wnioski.

Dorobić element przeliczający wartość ustawioną w tablicy na wartość napięcia. Napięcie referencyjne wykorzystywane do obliczeń ma być zadawane z panelu operatora (Front Panel). Macierz na liczbę można zamienić korzystając z odpowiedniej konwersji (boolean array to number).

Uruchomić program. Porównać wartości wyliczane na podstawie zależności teoretycznych z wartościami uzyskiwanymi na wyjściu przetwornika. Wysnuć i zanotować wnioski.

5.3. Badanie przetwornika analogowo-cyfrowego w trybie pracy ręcznej

Do realizacji układu przetwornika analogowo-cyfrowego potrzebny jest oprócz przetwornika cyfrowo-analogowego, opracowanego w poprzednim punkcie ćwiczenia, układ porównania ustawionego napięcia z napięciem mierzonym (wejściowym). Wykorzystywany jest do tego komparator, o obsługę którego należy rozbudować tworzony program. Przy współpracy z kartą pomiarową USB-6009 wyjście komparatora dołączone jest do linii 0 portu 1. Aby była możliwa programowa obsługa komparatora należy odpowiednio skonfigurować kartę pomiarową. W tym celu ponownie skorzystamy z kreatora DAQ Assistant. Ponieważ chcemy odczytywać stan komparatora wybieramy opcję Acquire Signal, a następnie port 1 i linię 0. Zmieniamy nazwę na komparator i kończymy działanie kreatora. Na wyjściu utworzonego bloku wystawiany jest sygnał stanu komparatora w postaci tablicy jednoelementowej. Do dalszego użycia potrzebujemy jednej wartości (nie w postaci tablicy), dlatego używając funkcji Index array (z palety Arrays) należy wyjąć element o indeksie 0 i wyświetlić go w postaci wskaźnika opisanego komparator.

Rozbudowany schemat porządkujemy i korzystając z linii Error Out oraz Error IN łączymy tak, aby w pętli wykonywane były działania w następującej kolejności:

- zadanie wartości na wejście przetwornika cyfrowo-analogowego,
- odczekanie czasu 0,2 sekundy,
- odczytanie i wyświetlenie stanu komparatora.

Przed uruchomieniem należy w modelu przetwornika przełączyć tryb pracy na ADC, tak aby napięcie wyjściowe z przetwornika cyfrowo-analogowego było podawane na jedno z wejść komparatora (woltomierz podłączony do wejścia F w tym trybie nie pokazuje mierzonego napięcia i nie należy go odczytywać).

Uruchomić program. Zmieniając stany bitów obserwować zachowanie komparatora. W zależności od przyjętego sposobu postępowania możliwa jest realizacja algorytmu przetwornika z kompensacją równomierną lub wagową (sukcesywną aproksymacją).

Po pozytywnej realizacji metody kompensacyjnej w trybie ręcznym należy naszkicować algorytm realizacji automatycznej metody sukcesywnej aproksymacji (kompensacji wagowej)

z użyciem utworzonych bloków (przetwornika cyfrowo-analogowego z możliwością zadawania kolejnych wartości poprzez zmianę stanu poszczególnych bitów oraz komparatora).

5.4. Realizacja programowa algorytmu przetwarzania analogowo-cyfrowego z kompensacją wagową

Do realizacji metody kompensacji wagowej potrzebne jest dodatkowo miejsce, gdzie można na bieżąco składować zadawaną wartość na wejście przetwornika cyfrowo-analogowego. Ponieważ pracujemy w pętli można do tego celu wykorzystać rejestr przesuwny (Shift register) przechowujący wartość tablicy wysyłanej do przetwornika. Korzystnie jest mieć możliwość podglądu wartości znajdującej się w tej tablicy. Można to łatwo zrealizować stawiając kursor myszy na wyjściu elementu zadającego dane (Data) do przetwornika cyfrowo-analogowego. Utworzony element na panelu rozciągamy oraz uaktywniamy go podobnie jak w punkcie 2.

Aby umożliwić poprawną pracę programu, na początku w utworzonym rejestrze przesuwym powinna zostać umieszczona tablica 8 wartości False. Ponieważ nie będziemy już zadawać wartości ręcznie to można do tego użyć utworzonego w punkcie 2 zadajnika. W tym celu najpierw ustawiamy wszystkie wartości tablicy na 0 (wyłączone), następnie prawym klawiszem myszy w menu wybieramy opcję Change to constant. Tak utworzoną stałą (na Block Diagram) przesuwamy poza pętlę z lewej strony i podłączamy do wejścia rejestru przesuwego. W przypadku realizacji metody kompensacyjnej znana jest liczba kroków, wynikająca z rozdzielczości przetwornika. Stąd też wiemy ile razy ma wykonać się pętla. Dlatego należy zmienić typ używanej struktury poprzez najechanie myszą na ramkę i prawym klawiszem wybranie opcji Replace For Loop. Następnie należy do wejścia ilości wykonań pętli (N) podłączyć stałą określającą ile razy pętla ma się wykonać oraz usunąć zbędny w tej pętli klawisz Stop.

Do aktualizacji tablicy bit po bicie można wykorzystać funkcję Replace into array (z palety Arrays).

Do wyboru działania w zależności od stanu komparatora można użyć funkcji Select (z palety Comparison) lub też struktury Case.

Zrealizować algorytm przetwarzania analogowo-cyfrowego wykorzystującego metodę kompensacji wagowej. Sprawdzić jego działanie obserwując w trakcie pracy zachowanie wskaźnika ustawianych bitów. Po zakończeniu działania porównać otrzymaną wartość napięcia z napięciem mierzonym. Aby zmierzyć napięcie mierzone należy woltomierz odłączyć od wejścia F i końcówką pomiarową dotknąć zwory pomiędzy wejściem A i B w modelu. Zmienić wartość napięcia za pomocą potencjometru na modelu i wykonać badanie ponownie. Na podstawie zmierzonych za pomocą zrealizowanego przetwornika wartości oraz napięcia zmierzonego woltomierzem wysnuć wnioski i wytłumaczyć różnicę w wynikach.

6. Literatura

1. „Miernictwo Elektryczne. Cyfrowa technika pomiarowa”. M. Stabrowski, OWPW 1999