

SPIS OZNACZEŃ

- δI_{nt} – dryft temperaturowy prądu niezrównoważenia wzmacniacza w przeliczeniu na 1 °C
- δI_{pT} – dryft temperaturowy prądu polaryzacji wzmacniacza w przeliczeniu na 1 °C
- δU_{nt} – dryft czasowy napięcia niezrównoważenia w podanym okresie czasu
- δU_{nT} – dryft temperaturowy napięcia niezrównoważenia wzmacniacza w przeliczeniu na 1 °C
- ΔI_{nT} – zmiana prądu niezrównoważenia wzmacniacza wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT
- ΔI_{p1T} oraz ΔI_{p2T} – zmiany odpowiednich prądów polaryzacji wzmacniacza I_{p1} oraz I_{p2} wywołane zmianą temperatury otoczenia o ΔT
- ΔR_T – zmiana rezystancji rezystora wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT
- ΔR_t – zmiana rezystancji rezystora obserwowana w przedziale czasowym Δt
- ΔU_{nt} – zmiana napięcia niezrównoważenia wzmacniacza zaobserwowana w przedziale czasowym Δt
- ΔU_{nT} – zmiana napięcia niezrównoważenia wzmacniacza wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT
- ΔU_{nw} – zmiana napięcia niezrównoważenia wzmacniacza wywołana zmianą napięcia wspólnego ΔU_{ws}
- ΔU_{nz} – zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą napięcia zasilania ΔU_z
- ΔU_{oT} – zmiana napięcia odniesienia wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT
- ΔU_{ot} – zmiana napięcia odniesienia zaobserwowana w przedziale czasowym Δt
- ΔU_{oU} – zmiana napięcia odniesienia wywołana zmianą napięcia zasilania ΔU_z
- I_n – wejściowy prąd niezrównoważenia wzmacniacza
- I_o – prąd źródła odniesienia
- I_{p1} – prąd polaryzacji wejścia nieinwersyjnego wzmacniacza
- I_{p2} – prąd polaryzacji wejścia inwersyjnego wzmacniacza
- I_{sp} – prąd szczytkowy w stanie otwartym przełącznika analogowego
- I_z – prąd zasilania
- K_U – wzmocnienie napięciowe
- N – liczba

- R_{op} – rezystancja w stanie otwartym przełącznika analogowego
 R_{pp} – rezystancja w stanie przewodzenia (zwarciowa) przełącznika analogowego
 R_{sw} – rezystancja dla napięcia wspólnego wzmacniacza
 R_{we} – rezystancja wejściowa
 R_{wy} – rezystancja wyjściowa
 Q – kwant sygnału wyjściowego przetwornika cyfrowo-analogowego
 t_{op} – czas opóźnienia przełączania przełącznika analogowego
 t_p – czas przetwarzania (pobierania próby) układu cyfrowego
 t_r – czas repetycji (kwantowania) układu cyfrowego
 U_o – napięcie źródła odniesienia
 U_r – różnicowe napięcie wejściowe wzmacniacza
 U_{sp} – napięcie szczytowe w stanie przewodzenia przełącznika analogowego
 U_w – wejściowe napięcie wspólne wzmacniacza
 U_{wy} – napięcie wyjściowe
 $\pm U_z$ – napięcia zasilania
 V – wielkość fizyczna
 $WTNZ$ – współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilania wzmacniacza
 $WTSW$ – współczynnik tłumienia napięcia wspólnego wzmacniacza
 X, Y, Z – sygnał analogowy, sygnał cyfrowy

1. WSTĘP

W dobie dominacji układów mikroprocesorowych do budowy elektronicznych urządzeń i systemów automatyki, pomiarów oraz testowania powszechnie są stosowane elektroniczne przetworniki cyfrowo-analogowe. Przetworniki te przetwarzają z dużą dokładnością wypracowane w układach mikroprocesorowych sygnały cyfrowe na analogowe wartości napięć, prądów lub rezystancji, stosując elektroniczne przełączniki analogowe, zestawy precyzyjnych rezystorów, źródła sygnałów odniesienia oraz układy liniowe wzmacniaczy monolitycznych.

Bez przetworników cyfrowo-analogowych nie można realizować ciągłych sygnałów wyjściowych urządzeń automatyki oddziałujących na procesy przemysłowe, ani formować ciągłych sygnałów kontrolnych dla celów autotestowania systemów i urządzeń pomiarowych. Nie można też konstruować dokładnych symulatorów napięć, prądów oraz rezystancji niezbędnych dla mikroprocesorowych zestawów testowania różnorodnych przetworników i elementów pomiarowych, których wejściami muszą być bardzo dokładne, sterowane cyfrowo wartości wielkości elektrycznych.

W literaturze specjalistycznej [5, 13, 37, 57] brak jest opisu prostych metod analizy układów przetworników cyfrowo-analogowych stosujących przełączniki analogowe, źródła sygnałów odniesienia oraz wzmacniacze monolityczne. Odpowiednie metody analizy są niezbędne do określania dokładności układów elektronicznych służących do formowania sygnałów analogowych. Dlatego ważnym celem niniejszej pracy jest przedstawienie odpowiedniej metody analizy właściwości statycznych liniowych układów elektronicznych jakimi są przetworniki cyfrowo-analogowe. Bardzo ważnym osiągnięciem autora jest przedstawienie metody wspomaganiej komputerowo, która umożliwi dokładną analizę na wyrażeniach symbolicznych sygnałów i pozwala na łatwy analityczny opis jakie wielkości i czynniki wpływają na pracę wielowzmacniaczowego układu przetwornika cyfrowo-analogowego.

Właściwości dynamiczne przetworników cyfrowo-analogowych nie są omawiane w niniejszej pracy. Przetworniki te stosują wzmacniacze ze sprzężeniami zwrotnymi. Właściwości dynamiczne wzmacniaczy wynikające z teorii sprzężenia zwrotnego opisano w literaturze [4, 14, 19, 38].

Błędy odwzorowania sygnałów układów elektronicznych określa się, zazwyczaj przeprowadzając badanie wrażliwości tych sygnałów w danym układzie elektronicznym na różne czynniki zewnętrzne, takie jak temperatura, napięcie zasilania, upływ czasu.

Wpływ czynników zewnętrznych na sygnały układu elektronicznego stanowi wynikowy efekt oddziaływania tych czynników na poszczególne parametry różnych elementów elektronicznych zastosowanych w analizowanym układzie.

Należy zwrócić uwagę, że do budowy nowoczesnych układów elektronicznych przetwarzania sygnałów stosuje się odpowiednie technologie zapewniające formowanie elementów elektronicznych bardzo wysokiej jakości.

Właściwości układów przetwarzania sygnałów cyfrowych na sygnały analogowe można charakteryzować wrażliwością ich sygnałów wyjściowych na zmiany parametrów elementów układu elektronicznego. Ale sygnały układu elektronicznego oraz symulowane przez układ elektroniczny impedancje czy admitancje, są niczym innym jak napięciami lub prądami lub ilorazami tych wartości, występującymi na wyjściach wzmacniaczy zastosowanych w układzie. Tak więc, analiza parametrów statycznych układu elektronicznego sprowadza się do analizy napięć i prądów lub ich ilorazów występujących w danym układzie, traktowanych jako funkcje parametrów poszczególnych elementów zastosowanych w układzie.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wstęp.

W rozdziale drugim opisano funkcje przetworników cyfrowo-analogowych, omówiono sygnały cyfrowe i ważniejsze sposoby kodowania sygnałów cyfrowych oraz przedstawiono właściwości źródeł sygnałów analogowych prądowych i napięciowych.

W rozdziale trzecim dokonano przeglądu najbardziej rozpowszechnionych układów przetworników cyfrowo-analogowych o wyjściach napięciowych i prądowych, przetworników z cyfrowo sterowaną konduktancją lub rezystancją na wejściu wzmacniacza, przetworników z cyfrowo sterowaną transmitancją drabinek rezystancyjnych oraz przetworników z cyfrowo sterowaną konduktancją lub rezystancją w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Omówiono układy przetworników z cyfrowo sterowanymi dzielnikami napięcia, przetworniki z cyfrowo przełączanymi źródłami prądowymi o jednakowych wartościach oraz o wartościach wagowych. Przedstawiono także przetworniki z cyfrowo sterowanym współczynnikiem wypełnienia ciągu impulsów.

W rozdziale czwartym przedstawiono mało znane układy przetworników cyfrowo-analogowych zwanych cyfrowo sterowanymi symulatorami rezystancji. Omówiono symulatory rezystancji wykorzystujące układy wzmacniaczowe konwerterów lub inwerterów impedancji znanych z teorii aktywnych elektrycznych układów liniowych. Przedstawiono także, opracowany przez autora, przykład symulatora rezystancji wykorzystującego układy wzmacniaczowe z cyfrowo sterowanym wzmocnieniem sygnału prądowego wymuszanego na zaciskach symulatora.

W rozdziale piątym oraz w Dodatkach podano opisy ważniejszych parametrów elementów elektronicznych stosowanych w układach przetworników cyfrowo-analogowych. Przedstawiono schemat zastępczy wzmacniacza monolitycznego oraz określono jego parametry. Przedstawiono charakterystykę grup wzmacniaczy monolitycznych i dokonano przeglądu parametrów najczęściej stosowanych typów wzmacniaczy. Dokonano przeglądu parametrów pozostałych elementów elektronicznych stosowanych w przetwornikach cyfrowo-analogowych takich jak: przełączniki sygnałów analogowych, dokładne rezystory oraz źródła napięć i prądów odniesienia.

W rozdziale szóstym przedstawiono schemat zastępczy układu elektrycznego ze wzmacniaczami oraz podano opis ogólny metody zerowych napięć wejściowych do analizy układu z wieloma wzmacniaczami. W rozdziale tym przedstawiono metodę zerowych napięć wejściowych z zastosowaniem zmodyfikowanej metody napięć węzłowych do analizy obwodów z wieloma wzmacniaczami.

W rozdziale siódmym przedstawiono dwa przykłady analizy układów przetworników cyfrowo-analogowych przy wykorzystaniu przedstawionej przez autora metody, stosując rachunek macierzowy dla wielkości symbolicznych i wykorzystując odpowiednie wspomagające programy komputerowe MATLAB i Symbolic Math Toolbox.

Przykłady te dokumentują, że zastosowana przez autora zmodyfikowana metoda napięć węzłowych wspomagana programami komputerowymi stanowi doskonałe narzędzie do analizy rozbudowanych elektronicznych układów wielowzmacniaczowych stosowanych w przetwornikach cyfrowo-analogowych.

Książka niniejsza jest przeznaczona dla szerokiego grona projektantów konstruktorów i użytkowników elektronicznych układów kondycjonowania i przetwarzania sygnałów analogowych oraz stanowi literaturę uzupełniającą dla studentów politechnik wydziałów informatycznych, elektrycznych i mechatronicznych.

2. PRZETWARZANIE CYFROWO-ANALOGOWE

2.1. Funkcje przetworników cyfrowo-analogowych

Zadaniem układów przetworników cyfrowo-analogowych jest przekształcanie sygnału cyfrowego na równoważny sygnał analogowy. Są to układy elektroniczne, które na podstawie informacji o charakterze cyfrowym, uzyskiwanych np. metodami techniki mikroprocesorowej formują sygnał analogowy w postaci dogodniejszej do interpretacji, oceny lub wizualizacji, a często w celu wykorzystania tego sygnału do sterowania procesami lub do testowania urządzeń pomiarowych wymagających cyfrowej symulacji sygnałów analogowych.

Cyfrowy sygnał wejściowy przetwornika odpowiednio koduje liczbę N_{we} , a analogowy sygnał wyjściowy reprezentuje tę liczbę w postaci analogowej:

$$X_{wy} = N_{we} Q \quad (2.1)$$

gdzie: Q – kwant analogowego sygnału wyjściowego.

Sygnały cyfrowe podawane na wejście przetwornika cyfrowo-analogowego mogą być zarówno szeregowy jak i równoległy oraz są wyrażone w odpowiednio dobranym kodzie. Sygnały szeregowy z reguły są przetwarzane na sygnały równoległe konieczne do sterowania przetwornikiem cyfrowo-analogowym. Tak więc, w omawianych przetwornikach stosuje się sygnały równoległe oraz różne rodzaje kodu dwójkowego.

Równanie opisujące charakterystykę przetwarzania przetwornika musi uwzględniać zastosowany kod sygnału wejściowego. Przykładowe równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu kodu ułamkowego naturalnego dwójkowego wyrazi się wzorem:

$$X_{wy} = X_{max} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n}) \quad (2.2)$$

gdzie: X_{max} – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika

a_1, a_2, \dots, a_n – funkcje dwuwartościowe (współczynniki) określające stany poszczególnych bitów mogące przyjmować tylko dwie wartości 0 lub 1.

Współczynnik a_1 określa stan najbardziej znaczącego bitu (MSB – *most significant bit*), a współczynnik a_n określa stan najmniej znaczącego bitu (LSB – *least significant bit*) wejściowego sygnału cyfrowego. Zestaw wszystkich współczynników od a_1 do a_n nazywa się krótko bitami danej cyfry.

Przetwornik cyfrowo-analogowy wytwarza sygnał analogowy na podstawie zakodowanych informacji cyfrowych. Każdej wartości cyfrowej na wejściu przetwornika jest jednoznacznie przyporządkowana jedna wartość sygnału analogowego na wyjściu. Charakterystyka analogowego sygnału wyjściowego w funkcji zmian sygnału cyfrowego zawiera tylko skwantowane wartości analogowe odpo-

wiadające kolejnym wartościom cyfrowym na wejściu. Jest to więc charakterystyka nieciągła.

Badając tę charakterystykę statycznie, zadając kolejno wzrastające wartości sygnału cyfrowego, zauważymy, że minimalne zmiany wartości sygnału wyjściowego odpowiadają wartości najmniej znaczącego bitu – LSB. Przy pracy dynamicznej rzeczywistego układu przetwornika cyfrowo-analogowego mogą wystąpić na jego wyjściu znacznie większe zakłócenia, zwane szpilkowymi [37], dochodzące do wartości najbardziej znaczącego bitu – MSB, co wynika z opóźnień przełączania kolejnych wartości bitów. Przy pracy dynamicznej przetwornika, w celu uzyskania przebiegów sygnału wyjściowego o charakterze sygnału ciągłego, konieczne jest wprowadzenie filtracji sygnału wyjściowego filtrem dolnoprzepustowym.

Przetworniki cyfrowo-analogowe mogą mieć sygnały wyjściowe napięciowe lub prądowe jednokierunkowe zwane też unipolarnymi lub sygnały wyjściowe napięciowe lub prądowe dwukierunkowe zwane bipolarnymi. Realizacja sygnału wyjściowego dwukierunkowego wymaga zastosowania odpowiedniego kodowania wejściowego sygnału cyfrowego.

Przetworniki cyfrowo-analogowe, których wielkością wyjściową jest impedancja, zwane często symulatorami impedancji, mogą formować sygnał zarówno dodatniej jak i ujemnej impedancji. Przy symulowaniu dodatniej impedancji mówimy o inwerterze dodatnio impedancyjnym, a przy symulowaniu ujemnej impedancji mówimy o inwerterze ujemno impedancyjnym [47]. Autorowi nie są znane ani potrzeby, ani przykłady realizacji przetwornika cyfrowo-analogowego z wyjściem impedancji o zmienianym znaku z dodatniego na ujemny, chociaż w układach wielowzmacniaczowych istnieje możliwość takiej realizacji.

2.2. Kody cyfrowe

Sygnały cyfrowe są reprezentowane przez odpowiednie kody cyfrowe, stanowiące uporządkowane zbiory funkcji dwuwartościowych, z których każda może przyjmować tylko jedną z dwu różnych wartości: zero (0) lub jeden (1). Funkcje dwuwartościowe są często zwane stanami logicznymi przypisywanymi poszczególnym bitom w zapisie sygnału cyfrowego, lub przypisywanymi poszczególnym równoległym wejściom sygnałów dyskretnych przetwornika.

W fizycznym układzie przetwornika z określonymi stanem logicznym na wejściu, wiąże się obecność lub nieobecność ustalonego poziomu napięcia najczęściej odniesionego do wspólnego punktu wejścia cyfrowego zwanego w gwarze technicznej „zerem cyfrowym” lub „masą cyfrową” oraz „common” w piśmiennictwie angielskim. W przetwornikach cyfrowo-analogowych poziomy napięcie odpowiadające stanom logicznym zero-jedynkowym są zgodne z poziomami logicznymi scalonych układów cyfrowych: CMOS, TTL lub ECL. Należy zauważyć, że inne licznie stosowane w przeszłości standardy poziomów napięć logicznych scalonych układów cyfrowych RLT (logika rezystorowo-

tranzystorowa), DTL (logika diodowo-tranzystorowa), HTL (logika wysoko-progowa), DCTL (logika tranzystorowa o sprzężeniu bezpośrednim), MOS (logika metal-tlenek-półprzewodnik) [46] nie są praktycznie spotykane w przetwornikach cyfrowo-analogowych.

Kody unipolarne

Przetworniki cyfrowo-analogowe o wyjściowym sygnale unipolarnym stosują zazwyczaj następujące kody wejściowego sygnału cyfrowego:

- naturalny kod dwójkowy
- ułankowy naturalny kod dwójkowy
- kod dwójkowo-dziesiętny pozycyjny, zwany też zapisem dziesiętnym kodowanym dwójkowo, w skrócie BCD [37].

Kod, w którym każdej pozycji jest przyporządkowana określona waga o podstawie 2 z potęgą: od 2^0 do 2^{n-1} lub od 2^{-1} do 2^{-n} , nazywa się kodem ważonym. Wartość liczbową zapisaną w tym kodzie jest równa sumie wag na tych wszystkich pozycjach, dla których funkcje dwuwartościowe przyjmują wartość 1.

W systemach mikroprocesorowych zazwyczaj jest stosowany naturalny kod dwójkowy. Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu naturalnego kodu dwójkowego wyrazi się wzorem:

$$X_{wy} = X_{max} 2^{-n} (b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \dots + b_0 2^0) \quad (2.3)$$

gdzie: X_{max} – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika,

$b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_0$ – współczynniki określające stany poszczególnych bitów.

Należy zauważyć, że najmniej znaczący bit (LSB) jest bitem zerowym o wadze 2^0 , a bit (n-1) jest najbardziej znaczącym bitem (MSB) o wadze 2^{n-1} , przy czym, gdy liczy się wartość sygnału wyjściowego, wtedy obydwie wagi bitów są dzielone przez wartość liczbową 2^n , zwaną pełnym zakresem przetwarzania - FS (*Full Scale*). Warto zauważyć, że pełny zakres przetwarzania $FS = 2^n$ jest stanem nieosiągalnym dla największej wartości liczby binarnej zawartej w nawiasie we wzorze (2.3), i że pełny zakres przetwarzania jest większy od maksymalnej wartości sygnału o wartość najmniej znaczącego bitu (LSB). Maksymalna wartość sygnału cyfrowego odpowiada stanom logicznym o poziomie 1 dla wszystkich bitów wejścia cyfrowego, co występuje, gdy wszystkie współczynniki od b_{n-1} do b_0 przyjmują wartość 1.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu ułankowego naturalnego kodu dwójkowego omówiono wcześniej i opisano wzorem (2.2).

W przetwornikach cyfrowo-analogowych przy analizie względnych zmian sygnału wyjściowego wygodniejsze jest korzystanie z ułamkowego naturalnego kodu liczb dwójkowych. W n-bitowym ułamkowym naturalnym kodzie dwójkowym najbardziej znaczący bit MSB ma wagę $2^{-1} = 0,5$, bit drugi ma wagę 0,25 itd. aż do bitu n – jest to najmniej znaczący bit (LSB) z wagą 2^{-n} . Przy stosowaniu ułamkowego naturalnego kodu liczb dwójkowych pełny zakres przetwarzania (FS) jest równy dokładnie wartości 1, a maksymalna osiągalna wartość sygnału jest równa $1 - 2^{-n} = 1 - \text{LSB}$. Należy zwrócić uwagę, że w przetwornikach o wysokiej rozdzielczości wartość najmniej znaczącego bitu (LSB) jest praktycznie pomijalna. Dlatego maksymalna wartość sygnału jest praktycznie równa pełnemu zakresowi przetwarzania (FS). Uzasadnia to ogromną wygodę stosowania ułamkowego naturalnego kodu liczb dwójkowych do opisu przetworników cyfrowo-analogowych.

Kodami ważonymi są kody dwójkowo-dziesiętne pozycyjne należące do kodów BCD, takie jak stosowany dawniej kod o wagach 2421 (kod Aikena) i najpopularniejszy obecnie kod o wagach 8421 dla ułamkowej liczby dziesiętnej. W zapisie BCD bity pierwszej dekadę z wagą 10^{-1} tworzą najbardziej znaczącą cyfrę (MSD – *master significant decade*), a bity ostatniej dekadę z wagą 10^{-m} , gdzie m liczba dekad, najmniej znaczącą cyfrę (LSD – *least significant decade*).

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu kodu dwójkowo-dziesiętnej pozycyjnej (BCD) wyrazi się wzorem:

$$X_{wy} = X_{max} [10^{-1} N_1 + 10^{-2} N_2 + \dots + 10^{-m} N_m] \quad (2.4)$$

gdzie: m – liczba dekad,

N_1 – cyfra pierwszej dekadę o wadze 10^{-1} ,

N_2 – cyfra drugiej dekadę o wadze 10^{-2} ,

N_m – cyfra ostatniej dekadę o wadze 10^{-m} .

Cyfry poszczególnych dekad dla kodu BCD o wagach 8421 można opisać wzorami:

$$N_1 = a_{13} 2^3 + a_{12} 2^2 + a_{11} 2^1 + a_{10} 2^0 = a_{13} 8 + a_{12} 4 + a_{11} 2 + a_{10} 1 \quad (2.5)$$

gdzie: $a_{13}, a_{12}, a_{11}, a_{10}$ – funkcje dwuwartościowe stanowiące składowe bity pierwszej dekadę tworzące najbardziej znaczącą cyfrę MSD o wadze 10^{-1} ,

$$N_2 = a_{23} 2^3 + a_{22} 2^2 + a_{21} 2^1 + a_{20} 2^0 = a_{23} 8 + a_{22} 4 + a_{21} 2 + a_{20} 1 \quad (2.6)$$

gdzie: $a_{23}, a_{22}, a_{21}, a_{20}$ – funkcje dwuwartościowe stanowiące składowe bity drugiej dekadę tworzące drugą cyfrę o wadze 10^{-2} ,

$$N_m = a_{m3} 2^3 + a_{m2} 2^2 + a_{m1} 2^1 + a_{m0} 2^0 = a_{m3} 8 + a_{m2} 4 + a_{m1} 2 + a_{m0} 1 \quad (2.7)$$

gdzie: $a_{m3}, a_{m2}, a_{m1}, a_{m0}$ – funkcje dwuwartościowe stanowiące składowe bity ostatniej dekadę tworzące najmniej znaczącą cyfrę (LSD) o wadze 10^{-m} .

Podstawową zaletą kodu BCD jest wygoda odczytu liczb dziesiętnych zapisanych w kodzie dwójkowym. Wadą kodu BCD jest to, że wykorzystuje się tylko dziesięć grup stanów bitów (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) dla każdej dekady na szesnaście możliwych tych stanów. Wadą jest też to, że maksymalna wartość cyfry każdej dekady jest równa 9 w zapisie BCD i nie jest ona równa wartości maksymalnej wynoszącej 15, jak dla cyfry czterobitowej zapisanej w naturalnym kodzie dwójkowym.

Niekiedy w przetwornikach cyfrowo-analogowych budowanych przy użyciu monolitycznych przełączników prądowych bywa stosowany unipolarny komplementarny naturalny kod dwójkowy lub kod BCD. W kodzie tym wszystkie bity są reprezentowane przez ich uzupełnienia utworzone przez inwersję $0 \rightarrow 1$ i $1 \rightarrow 0$ stanów wszystkich bitów.

Charakterystykę przetwornika cyfrowo-analogowego o sygnale wejściowym w komplementarnym ułamkowym naturalnym kodzie dwójkowym można opisać wzorem:

$$X_{wy} = X_{max} (c_1 2^{-1} + c_2 2^{-2} + \dots + c_n 2^{-n}) \quad (2.8)$$

gdzie: X_{max} – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika

c_1, c_2, \dots, c_n – negacje funkcji dwuwartościowych określających stany poszczególnych bitów cyfrowego sygnału sterującego.

Charakterystykę przetwornika o sygnale wejściowym w komplementarnym ułamkowym kodzie BCD opisuje wzór (2.4), a wzór opisujący cyfrę kolejnej k -tej dekady w kodzie komplementarnym BCD 8421 ma następującą postać:

$$N_k = c_{k3} 2^3 + c_{k2} 2^2 + c_{k1} 2^1 + c_{k0} 2^0 = c_{k3} 8 + c_{k2} 4 + c_{k1} 2 + c_{k0} 1 \quad (2.9)$$

gdzie: $c_{k3}, c_{k2}, c_{k1}, c_{k0}$ – negacje funkcji dwuwartościowych stanowiących bity k -tej dekady tworzące cyfrę o wadze 10^{-k} .

Kody bipolarne

Liczby dodatnie i ujemne zapisywane przy użyciu kodów bipolarnych, w procesie przetwarzania przetwornika cyfrowo-analogowego, formują standardowe wartości sygnału analogowego zmieniającego zarówno swój znak jak i wartość. W tym celu kod cyfrowy stosowany przy przetwarzaniu bipolarnych sygnałów analogowych zawiera dodatkowy bit znaku.

Bit znaku oznacza się zazwyczaj symbolem a_0 , a przejmuje on rolę najbardziej znaczącego bitu. Zazwyczaj przyjmuje się, że bit znaku dla liczby N większej od zera przyjmuje wartość $a_0 = 0$, a dla liczby N mniejszej od zera przyjmuje wartość $a_0 = 1$. Jednak są odstępstwa od tej zasady, które opisano dalej.

Przy założeniu, że liczba wszystkich bitów przetwornika łącznie z bitem znaku wynosi n , to najmniej znaczący bit będzie miał oznaczenie $n-1$, tak więc wartość najmniej znaczącego bitu dla przetwornika cyfrowo-analogowego stosującego kod bipolarny wyniesie $LSB = 2^{-(n-1)}$.

Dla przetwornika z wyjściem bipolarnym zakres zmian sygnału analogowego zwiększa się dwukrotnie i wynosi w przybliżeniu $2X_{\max}$, błąd tego przybliżenia stanowi zazwyczaj wartość 2 LSB lub LSB, a sygnał wyjściowy zmienia się w przybliżeniu od $-X_{\max}$ do $+X_{\max}$. Przy omawianiu poszczególnych kodów zapisu bipolarnego zostaną podane dokładne przedziały zmian sygnału wyjściowego przetwornika cyfrowo-analogowego przy danym kodzie zapisu.

Przetworniki cyfrowo-analogowe z wyjściowym sygnałem bipolarnym stosują zazwyczaj następujące kody bipolarne wejściowego sygnału cyfrowego:

- zapis znak-moduł (*sign-magnitude*)
- przesunięty kod dwójkowy, zwany też kodem dwójkowym skompensowanym (*offset binary*)
- zapis uzupełnień do 2, zwany też kodem dopełniającym (*two's complement*)
- zapis uzupełnień do 1 (*one's complement*).

Kod zapisu znak-moduł umożliwia najbardziej naturalne przetworzenie w przetworniku cyfrowo-analogowym liczb dodatnich i ujemnych. Moduły tych liczb są identyczne, a rozróżniane są jedynie bitem znaku a_0 , który dla liczby N większej od zera przyjmuje wartość $a_0 = 0$, a dla liczby N mniejszej od zera przyjmuje wartość $a_0 = 1$. Moduły tych liczb mogą być reprezentowane za pomocą np. ułamkowego naturalnego kodu dwójkowego lub ułamkowego kodu BCD o wagach 8421.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu kodu znak-moduł ma następującą postać przy zapisie modułu jako liczby ułamkowej w naturalnym kodzie dwójkowym:

$$X_{wy} = X_{\max} (1 - 2 a_0) (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_{n-1} 2^{-(n-1)}) \quad (2.10)$$

gdzie: X_{\max} - pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika (FS),

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ - funkcje dwuwartościowe (współczynniki) określające stany poszczególnych bitów.

Należy zauważyć, że dla ujemnej minimalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 1, a_1 = 1, a_2 = 1, \dots, a_{n-1} = 1$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 111...1) sygnał wyjściowy przyjmuje dolny zakres o wartości $-FS + LSB = -X_{\max} + 2^{-(n-1)}$.

Dla zerowej wartości liczby N opisywanej w skrócie 100...0 (jest to tzw. -0) lub opisywanej w skrócie 000...0 (jest to tzw. +0) sygnał wyjściowy przyjmuje wartość równą zero ($X_{wy} = 0$).

Dla dodatniej maksymalnej wartości przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 1, \dots, a_{n-1} = 1$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 011...1) sygnał wyjściowy przyjmuje górny zakres o wartości $+FS - LSB = +X_{\max} - 2^{-(n-1)}$. Jak widać, pełny zakres zmiany sygnału wyjściowego przetwornika wynosi $2 (FS - LSB)$.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu kodu znak-moduł ma następującą postać przy zapisie modułu jako liczby ułamkowej w kodzie BCD:

$$X_{wy} = X_{max} (1 - 2 a_0) [10^{-1} N_1 + 10^{-2} N_2 + \dots + 10^{-m} N_m] \quad (2.11)$$

gdzie: X_{max} - pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika (FS),
 a_0 - bit znaku.

Równania (2.5), (2.6) oraz (2.7) podają wzory na cyfry poszczególnych dekad N_1, N_2, \dots, N_m .

Kod znak-moduł jest stosowany w przetwornikach cyfrowo-analogowych, w których wartość wyjściowego sygnału analogowego zmienia się w pobliżu zera i gdy są wymagane łagodne przejścia od napięć dodatnich do napięć ujemnych.

Niedogodnością zapisu znak-moduł jest jednak istnienie dwóch różnych zapisów 000...0 oraz 100..0 dla tej samej liczby $N = 0$. Jest to powodem rzadkiego stosowania w przetwornikach tego rodzaju kodu bipolarnego.

Przesunięty kod dwójkowy zwany też kodem dwójkowym skompensowanym nie ma wymienionej wyżej niedogodności, gdyż uzyskuje się ten kod przez takie przesunięcie naturalnego kodu dwójkowego, aby zapisowi 100...0 odpowiadającemu połowie zakresu przetwarzania przetwornika cyfrowo-analogowego odpowiadał sygnał wyjściowy o wartości dokładnie równej zeru. Należy zwrócić uwagę, że dla tego kodu niektórzy autorzy [5, 37] zakładają, że bit znaku, który oznaczmy c_0 , przyjmuje wartość $c_0 = 1$ dla dodatniej liczby $N \geq 0$, oraz wartość $c_0 = 0$ dla ujemnej wartości liczby $N < 0$.

Przyjmuje się, że dla przesuniętego kodu dwójkowego bit znaku c_0 stanowi zanegowaną wartość funkcji dwuwartościowej a_0 stosowanej jako bit znaku dla innych kodów bipolarnych.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu przesuniętego kodu dwójkowego ma następującą postać:

$$X_{wy} = X_{max} [c_0 - 1 + a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_{n-1} 2^{-(n-1)}] \quad (2.12)$$

gdzie: X_{max} - pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika (FS),
 c_0 - bit znaku, $c_0 = 0$ (liczba N mniejsza od zera) lub $c_0 = 1$ (liczba N większa od zera),
 a_1, a_2, \dots, a_{n-1} - funkcje dwuwartościowe (współczynniki) określające stany poszczególnych bitów.

Należy zauważyć, że dla ujemnej minimalnej przetwarzanej liczby N o wartości wyznaczonej współczynnikami: $c_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 0, \dots, a_{n-1} = 0$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 000...0) sygnał wyjściowy przyjmuje dolny zakres o wartości $-FS = -X_{max}$.

Dla zerowej liczby N opisywanej w skrócie 100...0 sygnał wyjściowy przyjmuje wartość równą zeru $X_{wy} = 0$.

Dla dodatniej maksymalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $c_0 = 1, a_1 = 1, a_2 = 1, \dots, a_{n-1} = 1$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 111...1) sygnał wyjściowy przyjmuje górny zakres o wartości $+FS - LSB = +X_{\max} - 2^{-(n-1)}$.

Jak widać, pełny zakres zmiany sygnału wyjściowego przy omawianym kodzie przetwornika wynosi $2FS - LSB$.

Zaletą przesuniętego kodu dwójkowego jest jednoznaczny zapis (100...0) reprezentujący zero sygnału wyjściowego przetwornika.

Wadą przesuniętego kodu dwójkowego jest to, że największa zmiana stanów bitów występuje przy zerze, gdy wszystkie bity zmieniają swoje stany z 011...1 na 100...0, a to może powodować duże błędy dynamiczne w pracy przetwornika wynikające z niejednoczesności przełączania bitów.

Kod zapis uzupełnień do 2 zapewnia jednoznaczną reprezentację liczby równej zero i jest wygodny do wykonywania działań arytmetycznych.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika przy zastosowaniu kodu zapisu uzupełnień do 2 ma następującą postać:

$$X_{wy} = X_{\max} (-a_0 + a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_{n-1} 2^{-(n-1)}) \quad (2.13)$$

gdzie: X_{\max} – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika (FS),

a_0 – bit znaku, gdy liczba N większa od zera, wtedy $a_0 = 0$ oraz gdy liczba N mniejsza od zera, wtedy $a_0 = 1$,

a_1, a_2, \dots, a_{n-1} – funkcje dwuwartościowe (współczynniki) określające stany poszczególnych bitów.

Należy zauważyć, że dla ujemnej minimalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 0, \dots, a_{n-1} = 0$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 100...0) sygnał wyjściowy przyjmuje dolny zakres o wartości $-FS = -X_{\max}$.

Dla zerowej liczby N opisywanej w skrócie 000...0 sygnał wyjściowy przyjmuje wartość zero ($X_{wy} = 0$).

Dla dodatniej maksymalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 1, \dots, a_{n-1} = 1$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 011...1) sygnał wyjściowy przyjmuje górny zakres o wartości $+FS - LSB = +X_{\max} - 2^{-(n-1)}$.

Jak widać, pełny zakres zmiany sygnału wyjściowego przy omawianym kodzie przetwornika cyfrowo-analogowego wynosi $2FS - LSB$.

Zapis uzupełnień do 1 jest rzadko stosowanym kodem bipolarnym w przetwornikach cyfrowo-analogowych.

Równanie opisujące charakterystykę przetwornika cyfrowo-analogowego przy zastosowaniu kodu zapisu uzupełnień do 1 ma następującą postać:

$$X_{wy} = X_{\max} [(2^{-(n-1)} - 1)a_0 + a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_{n-1} 2^{-(n-1)}] \quad (2.14)$$

gdzie: X_{\max} – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika (FS),
 a_0 – bit znaku, gdy liczba N jest większa od zera, wtedy $a_0 = 0$ oraz gdy liczba N jest mniejsza od zera, wtedy $a_0 = 1$,
 a_1, a_2, \dots, a_{n-1} – funkcje dwuwartościowe (współczynniki) określające stany poszczególnych bitów.

Należy zauważyć, że dla ujemnej minimalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 0, \dots, a_{n-1} = 0$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 100...0), sygnał wyjściowy przyjmuje dolny zakres o wartości $-FS + LSB = -X_{\max} + 2^{-(n-1)}$.

Dla zerowej liczby N opisywanej w skrócie 1111...1 (jest to tzw. -0) lub opisywanej w skrócie 000...0 (jest to tzw. $+0$) sygnał wyjściowy przyjmuje wartość równą zero ($X_{wy} = 0$).

Dla dodatniej maksymalnej przetwarzanej liczby N wyznaczonej współczynnikami: $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 1, \dots, a_{n-1} = 1$ (liczbę taką będziemy w skrócie opisywać 011...1), sygnał wyjściowy przyjmuje górny zakres o wartości $+FS - LSB = +X_{\max} - 2^{-(n-1)}$.

Jak widać, pełny zakres zmiany sygnału wyjściowego przy omawianym kodzie przetwornika cyfrowo-analogowego wynosi $2(FS - LSB)$.

Niedogodnością zapisu uzupełnień do 1 jest jednak istnienie dwóch różnych zapisów 111...1 (tzw. -0) oraz 000...0 (tzw. $+0$) dla tej samej liczby $N = 0$. Jest to powodem rzadkiego stosowania w przetwornikach cyfrowo-analogowych tego rodzaju kodu bipolarnego.

2.3. Sygnały analogowe

Sygnały analogowe stanowią wartości napięć lub prądów odpowiednio odwzorowujące wartości wielkości fizycznych lub wartości parametrów stanowiących informację podlegającą przetworzeniu w danym urządzeniu. Zazwyczaj sygnały analogowe odwzorowują według zależności liniowej wartości wielkości i wartości parametrów podlegające przetworzeniu. Sygnały bardzo często są przesyłane liniami łączącymi urządzenia w celu dokonania wymiany informacji.

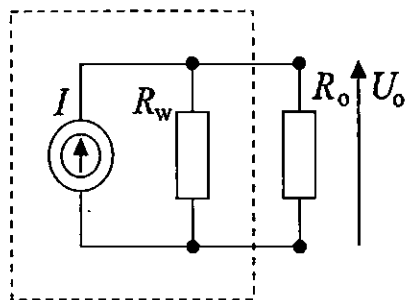
Źródła sygnałów analogowych i odbiorniki tych sygnałów powinny spełniać odpowiednie wymagania, aby ograniczyć wpływ właściwości linii przesyłowej na wartość sygnału w celu zminimalizowania błędów odczytu przesyłanej informacji.

Przy przesyłaniu sygnału na duże odległości, przy których rezystancja linii przesyłowej przyjmuje porównywalne wartości w stosunku do rezystancji odbiorników wejściowych, stosuje się sygnały prądowe. W tym wypadku wymaga się, aby źródło sygnału miało właściwości zbliżone do idealnego źródła prądowego. Przy przesyłaniu sygnału na małe odległości, przy których wartość rezystancji linii jest pomijalną w porównaniu do wartości rezystancji wejściowych odbiorników, stosuje się sygnały napięciowe. W tym wypadku wymaga się, aby źródło sygnału miało właściwości zbliżone do idealnego źródła napięcia.

2.4. Właściwości źródeł sygnałów prądowych

Schemat zastępczy źródła sygnału prądowego I obciążonego rezystancją R_o podaje rys. 2.1. Wielkościami charakterystycznymi źródła sygnału prądowego są:

- zakres zmian wartości prądu źródła I_{\min} , I_{\max}
- największa rezystancja obciążenia źródła $R_{o\max}$
- rezystancja wewnętrzna źródła R_w .



Rys. 2.1. Schemat zastępczy źródła sygnału prądowego

Wtórny parametrem jest dopuszczalne obciążenie napięciowe $U_{o\max}$ źródła prądowego, określane według wzoru:

$$U_{o\max} = R_{o\max} I_{\max} \quad (2.15)$$

Zakresy zmian prądu źródeł sygnałów prądowych wynikają z dokumentów normalizacyjnych. Powszechnie respektowana jest norma IEC 60381 [26].

W urządzeniach automatyki przemysłowej spotyka się następujące sygnały analogowe (podkreślono sygnały wynikające z IEC 60381):

- prądowe zerowe jednokierunkowe: 0...5 mA, 0...20 mA [26], 0...50 mA
- prądowe zerowe dwukierunkowe: -5...0...+5 mA, -20...0...+20 mA
- prądowe niezerowe: 1...5 mA, 4...20 mA [26], 10...50 mA.

Dopuszczalny zakres zmian rezystancji obciążenia R_o źródła sygnału prądowego jest zawarty w niżej podanym przedziale:

$$0 \leq R_o \leq R_{o\max} \quad (2.16)$$

IEC 60381 [26] nie określa maksymalnej rezystancji obciążenia źródeł sygnałów prądowych. Zestawienie przykładowych wartości tej wielkości dla stosowanego w Polsce sprzętu automatyki od różnych producentów podaje tabl. 2.1.

Tablica 2.1. Wartości dopuszczalnych obciążeń źródeł sygnałów prądowych dla przykładowych urządzeń automatyki przemysłowej

Grupa urządzeń	Vutronic	Protronik	Intelektran S	MASAP [51]
Firma	Honeywell	H B	ELMAT	PIAP
Sygnały	4...20 mA	0...20 mA	0...5 mA	0..20 mA/4..20 mA
Obciążenie napięciowe źródła U_{omax}	14 V	15 V	10 V	10 V
R_{omax}	700 Ω	750 Ω	2000 Ω	500 Ω

Wartość rezystancji wewnętrznej R_w źródła sygnału prądowego decyduje o błędzie sygnału prądowego przekazywanego do odbiornika przy określonej rezystancji obciążenia. Jedynie przy zerowej rezystancji obciążenia, wartość tego błędu jest zerowa. Analizując schemat zastępczy źródła sygnału prądowego podany na rys. 2.1, można zauważyć, że o wartości tego błędu decyduje prąd w rezystancji wewnętrznej źródła. Błąd względny odniesiony do zakresu zmian sygnału wyrazi się wzorem:

$$\delta_{R_o} = \frac{U_o}{R_w (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})} = \frac{R_o}{R_w} \frac{I}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}} \quad (2.17)$$

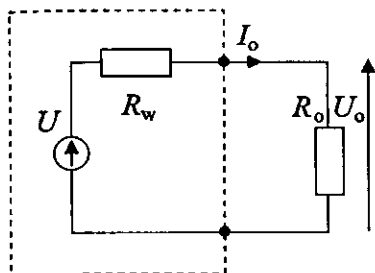
Dla zapewnienia odpowiednio małej wartości tego błędu, np. rzędu 0,01 %, należy dla typowych rezystancji obciążenia ok. 1 k Ω stosować źródła sygnału prądowego o rezystancji wewnętrznej R_w nie mniejszej niż 10 M Ω .

Dla zapewnienia jednakowego prądu w kilku odbiornikach sygnału prądowego odbiorniki powinny być łączone szeregowo ze źródłem sygnału prądowego.

2.5. Właściwości źródeł sygnałów napięciowych

Schemat zastępczy źródła sygnału napięciowego U obciążonego rezystancją R_o podaje rys. 2.2. Wielkościami charakterystycznymi źródła sygnału napięciowego są:

- zakres zmian wartości napięcia źródła $U_{\text{min}}, U_{\text{max}}$
- najmniejsza rezystancja obciążenia źródła R_{omin} , przy której źródło pracuje prawidłowo
- rezystancja wewnętrzna źródła R_w .



Rys. 2.2. Schemat zastępczy źródła sygnału napięciowego

Wtórny parametrem jest dopuszczalna obciążalność prądowa źródła sygnału napięciowego I_{omax} liczona jako ilorz największej wartości napięcia źródłowego i najmniejszej rezystancji obciążenia:

$$I_{\text{omax}} = \frac{U_{\text{omax}}}{R_{\text{omin}}} \quad (2.18)$$

Podobnie jak dla sygnałów prądowych, zakresy zmian wartości napięcia źródeł sygnałów napięciowych wynikają z normy IEC 60381-2 [25].

W urządzeniach automatyki przemysłowej spotyka się następujące sygnały analogowe (podkreślono sygnały wynikające z IEC 60381-2 [25]):

- napięciowe zerowe jednokierunkowe: 0...5 V, 0...10 V [25]
- napięciowe zerowe dwukierunkowe: -5...0...+5 V, -10...0...+10 V [25]
- napięciowe niezerowe: 1...5 V.

Zakres zmian rezystancji obciążenia R_o zawiera się w przedziale od najmniejszej dopuszczalnej wartości do nieskończoności:

$$R_{\text{omin}} \leq R_o \leq \infty \quad (2.19)$$

Dla sygnałów napięciowych dopuszcza się obciążalność prądową rzędu 5 mA. Wartości rezystancji obciążenia odbiorników są odpowiednio duże, tak że źródło sygnału napięciowego może być obciążane wieloma odbiornikami połączonymi równolegle.

IEC 60381-2 [25] nie określa minimalnej rezystancji obciążenia źródeł sygnałów napięciowych. Zestawienie przykładowych wartości tej wielkości dla stosowanego w Polsce sprzętu automatyki pochodzącego od różnych producentów podaje tablica 2.2.

Tablica 2.2. Wartości dopuszczalnych obciążeń źródeł sygnałów napięciowych dla przykładowych urządzeń automatyki przemysłowej

Grupa urządzeń	Contronic	Teleperm C	Intelektran S	MASAP [51]
Firma	HB	Siemens	ELMAT	PIAP
Sygnały	-3 V...0...+3 V	0...10 V	0...10 V	-10 V...0...+10 V
Obciążenie prądowe źródła I_{0max}	8,5 mA	10 mA	5 mA	5 mA
Najmniejsza rezystancja obciążenia R_{0min}	353 Ω	1000 Ω	2000 Ω	2000 Ω

Wartość rezystancji wewnętrznej R_w źródła sygnału napięciowego decyduje o błędzie sygnału napięciowego przekazywanego do odbiornika przy określonej rezystancji obciążenia. Patrząc na schemat zastępczy źródła sygnału napięciowego podany na rys. 2.2, można zauważyć, że o wartości tego błędu decyduje spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej źródła. Błąd względny odniesiony do zakresu zmian sygnału wyrazi się wzorem:

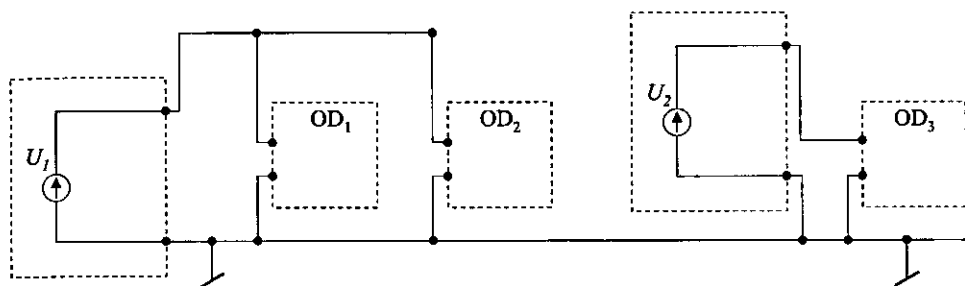
$$\delta_{R_o} = \frac{R_w I_o}{U_{max} - U_{min}} = \frac{R_w}{R_o} \frac{U_o}{U_{max} - U_{min}} \quad (2.20)$$

Dla zapewnienia odpowiednio małej wartości tego błędu, np. rzędu 0,01 %, dla typowych rezystancji obciążenia ok. 2 k Ω , należy stosować źródła sygnału napięciowego o rezystancji wewnętrznej R_w nie większej niż 0,2 Ω .

Odbiorniki sygnałów napięciowych łączy się równolegle, tak jak podaje przykładowo rys. 2.3, przy czym jeden z przewodów jest wspólny dla wszystkich źródeł sygnałów i odbiorników. Zgodnie z normą IEC [25] punkty obwodów sygnałowych o najniższym potencjale lub o potencjale zero w przypadku sygnałów bipolarnych powinny tworzyć wspólny punkt sygnałowy. Aby spełnić to wymaganie, wspólny przewód dla wszystkich źródeł sygnałów i odbiorników stanowiący wspólny punkt sygnałowy jest łączony do punktu (bieguna) zerowego zasilacza o dwu napięciach dodatnim i ujemnym lub jest łączony do bieguna minus przy stosowaniu zasilacza o jednym napięciu. Tak więc wspólny punkt sygnałowy jest jednocześnie wspólnym punktem zasilania.

Należy zwrócić uwagę, że w systemach automatyki przemysłowej wspólny punkt sygnałowy jest z reguły izolowany od masy (metalowej obudowy) urządzenia oraz izolowany od uziemienia. Z tego też powodu autor nie używa nie-

trafnej terminologii: „masa układu elektronicznego” ani „ziemia układu elektronicznego” jako synonimów wspólnego punktu sygnałowego układu elektronicznego.

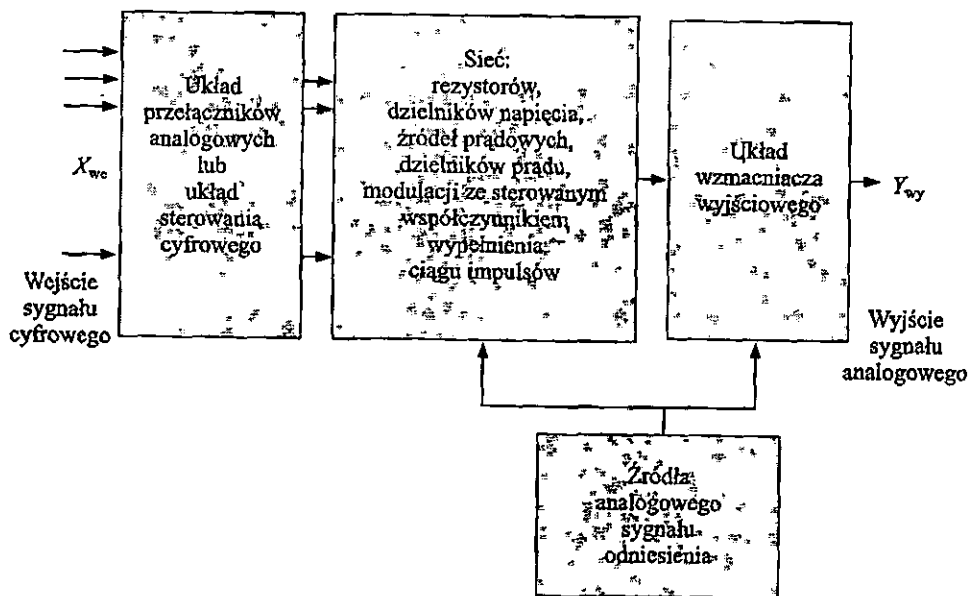


Rys. 2.3. Przykładowy układ połączeń odbiorników sygnałów napięciowych OD_1 , OD_2 , OD_3 w układzie wspólnego punktu sygnałowego

3. UKŁADY PRZETWORNIKÓW CYFROWO-ANALOGOWYCH Z WYJŚCIAMI NAPIĘCIOWYMI I PRĄDOWYMI

3.1. Zasada działania przetworników

Schemat blokowy przetwornika cyfrowo-analogowego podano na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat blokowy przetwornika cyfrowo-analogowego

Wejściowy sygnał cyfrowy X_{wc} o odpowiednim kodzie steruje stanami załączeń układu przełączników analogowych, które przełączają sieć: rezystorów precyzyjnych, lub dzielników napięcia, lub źródeł prądowych, lub dzielników prądu. Wejściowy sygnał cyfrowy może też odpowiednio pobudzać układ sterowania cyfrowego modulatora ze sterowanym współczynnikiem wypełnienia ciągu impulsów. Sieć wyżej wymieniona, lub układ modulatora, współpracuje ze źródłami analogowego sygnału odniesienia oraz układem wzmacniacza wyjściowego, który formuje analogowy sygnał wyjściowy Y_{wy} odpowiednio odwzorowujący, według kodu cyfrowego, wartość wejściowego sygnału cyfrowego.

Układ wzmacniacza wyjściowego może zawierać przełączaną sygnałem cyfrowym sieć rezystorów zarówno w obwodzie wejściowym wzmacniacza lub w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego tego wzmacniacza.

Źródła analogowego sygnału odniesienia oddziałujące na sieć i układ wzmacniacza mogą być źródłami stabilizowanymi, stałowartościowymi lub źródłami sterowanymi. Sterowane źródła sygnału odniesienia pozwalają realizować tak

zwane mnożące przetworniki cyfrowo-analogowe, których sygnał wyjściowy jest nie tylko funkcją wejściowego sygnału cyfrowego, ale jest też proporcjonalny do sterowanej wartości sygnału odniesienia.

Przedstawiony schemat blokowy ilustruje istnienie różnych zasad działania przetworników cyfrowo-analogowych.

Elektroniczne przetworniki cyfrowo-analogowe można podzielić według zasady działania na następujące grupy:

- 1) przetworniki z cyfrowo sterowaną rezystancją lub konduktancją na wejściu wzmacniacza formującego wyjściowy sygnał analogowy
- 2) przetworniki z cyfrowo sterowaną transmitancją drabinek rezystancyjnych na wejściu wzmacniacza formującego wyjściowy sygnał analogowy
- 3) przetworniki z cyfrowo sterowaną konduktancją lub rezystancją w obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza formującego wyjściowy sygnał analogowy
- 4) przetworniki z cyfrowo sterowanymi dzielnikami napięcia
- 5) przetworniki z cyfrowo przełączanymi źródłami prądowymi lub dzielnikami prądu
- 6) przetworniki z cyfrowo sterowanym układem modulacji ze zmiennym współczynnikiem wypełnienia ciągu impulsów.

Przetworniki należące do pierwszych pięciu grup są nazywane przetwornikami cyfrowo-analogowymi bezpośrednimi. Przetworniki należące do ostatniej grupy są nazywane przetwornikami cyfrowo-analogowymi pośrednimi, gdyż proces przetworzenia sygnału cyfrowego w sygnał analogowy obejmuje dwie operacje składowe:

- formowanie sygnału impulsowego pośredniego
- przetwarzanie sygnału pośredniego w sygnał analogowy napięciowy lub prądowy.

Pierwsza i druga grupa przetworników [11, 30, 55] należy do rozwiązań klasycznych. Wymaga ona dobrych źródeł napięcia odniesienia o małej rezystancji wewnętrznej, rezystancyjnych układów o liczbie precyzyjnych rezystorów równej liczbie bitów kodu cyfrowego lub o dwukrotnie większej liczbie rezystorów od liczby bitów oraz wymaga dokładnych sterowanych dwustanowo przełączników analogowych pojedynczych zwierno-rozwiernych lub podwójnych zwierno-rozwiernych i rozwierno-zwiernych.

Trzecią grupę przetworników [36, 58] cechuje duża prostota rozwiązania: proste źródło napięcia odniesienia, liczba precyzyjnych rezystorów odpowiada liczbie bitów kodu przetwornika oraz zastosowanie prostych pojedynczych przełączników analogowych.

W czwartej grupie są przetworniki do zastosowań specjalnych o bardzo dobrej liniowości, wymagające bardzo wysokiej rozdzielczości i o szerokim paśmie przenoszenia. Są tu, tak zwane przetworniki *c/a* z dzielonym napięciem (*voltage divider d/a converter*) [37]. Stosują one łańcuch wielu rezystorów szeregowych

tworzący dzielnik napięcia odniesienia, duże liczby przełączników analogowych typu MOS oraz wtórnik napięcia jako szerokopasmowy wzmacniacz wyjściowy.

Piąta z wyżej wymienionych grup przetworników [6, 11, 55, 56] wymaga stosowania dużej liczby dokładnych sterowanych dwustanowo źródeł prądowych lub sterowanych odpowiednich dzielników sygnału prądowego. Tę grupę cechuje bardzo duża szybkość działania. Właściwe pole zmian napięcia wyjściowego uzyskuje się za pomocą odpowiedniego wzmacniacza wyjściowego.

Ostatnia z wyżej wymienionych grup przetworników [5, 48] pomimo dość prostej realizacji układowej, nie zapewnia dużych dokładności przetwarzania. Ważną zaletą tych przetworników jest łatwa realizacja optoelektronicznej separacji galwanicznej obwodów wyjścia od wejścia, co jest powodem udanych zastosowań takich przetworników w sprzęcie automatyki przemysłowej [51, 52]. Niestety, ze względu na konieczność stosowania odpowiednich filtrów składowej zmiennej wyjściowego sygnału analogowego, przetworniki tej grupy mogą być stosowane tam, gdzie dopuszcza się małą szybkość przetwarzania przetwornika cyfrowo-analogowego. Literatura [5] podaje, że graniczna częstotliwość pracy repetycyjnej tych przetworników jest rzędu kilkuset herców.

3.2. Przetworniki z cyfrowo sterowaną rezystancją lub konduktancją na wejściu wzmacniacza

Prostą realizację funkcji przetwornika cyfrowo-analogowego można uzyskać w obwodzie elektrycznym jednooczkowym, przy zapewnieniu sterowania cyfrowego rezystancji tego obwodu lub zapewnieniu sterowania cyfrowego konduktancji tego obwodu.

W pierwszym przypadku sterowania cyfrowego rezystancji oczka należy zastosować w obwodzie tego oczka źródło prądu odniesienia, a sygnał analogowy proporcjonalny do sterowanej cyfrowo rezystancji sumarycznej oczka należy zbierać równoległe z tej rezystancji. Aby nie zakłócić proporcjonalnej zależności odbieranego napięcia od wartości cyfrowo sterowanej rezystancji, odbiór napięcia powinien się odbywać przy praktycznie pomijalnej, bardzo dużej rezystancji wejściowej układu odbierającego napięcie, co może zapewnić odpowiedni wzmacniaczowy wtórnik napięcia.

W drugim przypadku sterowania cyfrowego konduktancji oczka należy zastosować w obwodzie tego oczka źródło napięcia odniesienia, a sygnał analogowy proporcjonalny do sterowanej cyfrowo konduktancji sumarycznej oczka, należy odbierać jako prąd szeregowy tej sumarycznej konduktancji oczka. Aby nie zakłócić proporcjonalnej zależności odbieranego prądu od wartości cyfrowo sterowanej konduktancji, odbiór prądu powinien odbywać się przy praktycznie pomijalnej, bardzo małej rezystancji wejściowej układu odbierającego prąd, co może zapewnić odpowiedni wzmacniaczowy przetwornik prądu na napięcie.

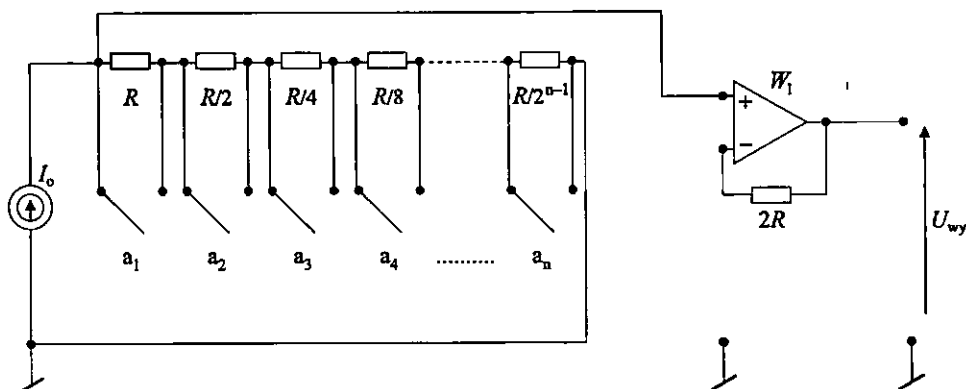
Rozpatrzmy układ przetwornika z cyfrowo sterowaną rezystancją oczka obwodu wejściowego wzmacniacza. Schemat układu takiego przetwornika podano

na rys. 3.2. W układzie tym zastosowano wzmacniaczowy wtórnik napięcia [34] o bardzo dużej, praktycznie pomijalnej rezystancji wejściowej, co zapewnia silne ujemne, szeregowe do wejścia, napięciowe sprzężenie zwrotne zastosowane w układzie wzmacniacza. W obwodzie wejściowym wzmacniacza znajduje się źródło prądu odniesienia I_0 i sterowana cyfrowo rezystancja, złożona z szeregowego połączenia rezystorów o wartościach wagowych $R, R/2, R/4, \dots, R/2^{n-1}$, przy czym rezystory są załączane lub zwierane w zależności od stanów 1 lub 0 poszczególnych bitów: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ wejściowego sygnału cyfrowego. Napięcie zbierane z szeregowego połączenia rezystorów załączanych lub wyłączanych (przez zwarcie) przełącznikami analogowymi sterowanymi cyfrowym sygnałem sterującym można wyrazić wzorem:

$$U_{we} = I_0 \sum_{k=1}^{k=n} R_k \quad (3.1)$$

gdzie: I_0 – prąd źródła odniesienia,

R_k – rezystancja k -tego rezystora wagowego uwzględniająca stan jego dołączenia szeregowego lub stan jego zwarcia sterowanym przełącznikiem k -tego bitu.



Rys. 3.2. Schemat przetwornika cyfrowo-analogowego z cyfrowo sterowaną rezystancją oczka obwodu wejściowego wzmacniaczowego wtórniaka napięcia

W obwodzie wzmacniaczowego wtórniaka napięcia zastosowano rezystor o wartości $2R$ w celu zminimalizowania wpływu prądów polaryzacji wejść wzmacniacza na charakterystykę przetwarzania w stanie pracy przetwornika, gdy sąysterowane prawie wszystkie najstarsze, a więc najbardziej znaczące bity.

Jeżeli dla sygnału sterującego przyjmie się przykładową charakterystykę przy zastosowaniu ułamkowego naturalnego kodu dwójkowego według wzoru (2.2) podanego w rozdziale 2, a wzmacniacz jest wtórnikiem napięcia o wzmacnieniu równym 1, to charakterystykę tego przetwornika opisze równanie:

$$U_{wy} = 2 I_0 R (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + a_4 2^{-4} \dots \dots \dots + a_n 2^{-n}) \quad (3.2)$$

gdzie: $2 I_0 R$ – pełny zakres sygnału wyjściowego przetwornika,
 a_1, a_2, \dots, a_n – funkcje dwuwartościowe określające stany poszczególnych bitów cyfrowego sygnału sterującego.

W przypadku zastosowania sterowanego prądu odniesienia I_0 , poprzez układ przetwornika napięcie prąd, np. o schemacie podanym na rys. 3.9, uzyskuje się układ przetwornika cyfrowo-analogowego mnożącego o charakterystyce opisanej podanym wyżej równaniem. Sygnał wyjściowy przetwornika jest formowany jako iloczyn wejściowego sygnału cyfrowego i sterowanego analogowo prądu odniesienia.

Należy zwrócić uwagę, że opisany tu prosty układ przetwornika cyfrowo-analogowego, dla zapewnienia dobrej dokładności przetwarzania, wymaga stosowania przełączników analogowych o pomijalnej rezystancji szeregowej stanu przewodzenia przełącznika R_{pp} o wartości rzędu $0,1 \Omega$. Rezystancje takie w stanie przewodzenia zapewniają przełączniki elektromechaniczne np. kontaktrony we ze stykami złożonymi i odpowiednio hermetyzowane w obudowach szklanych.

Należy zauważyć, że współczesne elektroniczne przełączniki analogowe, np. typu CMOS, zapewniają rezystancję w stanie przewodzenia rzędu kilkudziesięciu Ω , a w specjalnych wykonaniach rezystancję poniżej 1Ω (np. tranzystor unipolarny MOS z kanałem N typ IRFD220 firmy International Rectifier).

Dla omawianego układu przetwornika największy błąd przetwarzania powodowany niepomijalną rezystancją stanu przewodzenia R_{pp} wystąpi w stanie zwierania przez przełączniki analogowe wszystkich rezystorów wagowych, a więc w stanie, gdy sygnał wyjściowy powinien być równy zero. Sygnał wyjściowy przetwornika w takim przypadku nie będzie zerowy, lecz osiągnie wartość błędu bezwzględnego według wzoru:

$$\Delta U(R_{pp}) = I_0 R_{pp} n \quad (3.3)$$

gdzie: n - liczba bitów przetwornika cyfrowo-analogowego.

Błąd względny przetwornika przy realizacji zerowego sygnału wyjściowego, wyrażony w procentach odniesiony do maksymalnego zakresu przetwarzania $2 I_0 R$, można opisać wzorem:

$$\delta(R_{pp}) = \frac{n R_{pp}}{2R} 100 \% \quad (3.4)$$

Podany układ przetwornika, przy zastosowaniu najlepszych współczesnych przełączników analogowych MOS ($R_{pp} \cong 1 \Omega$) i dużej wartości rezystora wagowego $R = 5 \text{ k}\Omega$, umożliwi realizację przetworników o rozdzielczości odpowiadającej 10 bitom. Dla takich przetworników błędy względne wynikające z niepomijalnej rezystancji R_{pp} przełączników analogowych mają wartość ok. $0,1 \%$,

która jest zbliżona do wartości błędu rozdzielczości przetwarzania przetwornika 10-bitowego. Wartość tego błędu można zmniejszyć do połowy strojeniem funkcjonalnym układu przetwornika w procesie jego produkcji przez korygującą charakterystykę przetwarzania ujemną polaryzację wejścia wzmacniacza.

Warto zwrócić uwagę, że drugi charakterystyczny parametr przełączników analogowych, jakim jest rezystancja w stanie otwartym przełącznika analogowego R_{op} , dla współczesnych przełączników analogowych CMOS osiągająca wartości rzędu $10^{10} \Omega$, ma wpływ zupełnie niezauważalny na dokładność przetwarzania omówionego układu przetwornika.

W zastosowaniach praktycznych spotyka się drugą możliwą realizację przetwornika cyfrowo-analogowego z cyfrowo sterowaną konduktancją oczka obwodu wejściowego wzmacniacza. Warto zauważyć, że układ elektryczny tej drugiej realizacji przetwornika można utworzyć jako przekształcenie dualne [45] omówionej pierwszej, mało znanej realizacji przetwornika.

Źródło prądowe odniesienia I_o zastępuje się źródłem napięciowym odniesienia U_o . Połączenie równoległe źródła prądowego I_o z szeregowym łańcuchem rezystorów wagowych zastępuje się połączeniem szeregowym źródła napięciowego U_o z równoległym połączeniem rezystorów wagowych, co zapewnia liniowe sterowanie konduktancji sygnałem cyfrowym. Wyjście napięciowe z łańcucha rezystorów wagowych dołączone równoległe do wejścia wzmacniacza zastępuje się wyjściem prądowym do wejścia wzmacniacza połączonym szeregowo z elementem cyfrowo sterowanej konduktancji.

Drugi układ przetwornika cyfrowo-analogowego utworzony według przekształcenia dualnego jest podany na rys. 3.3. Jest to układ, którego odmiany są bardzo często przytaczane w literaturze [5, 13, 37, 48, 57] dotyczącej przetworników cyfrowo-analogowych. Rys. 3.3 podaje jego prostą odmianę z pojedynczymi przełącznikami analogowymi, bez podwójnych zwierno-rozwiernych i rozwierno-zwiernych przełączników analogowych, których użycie jest zbędne, jeżeli zostanie wykorzystany właściwy układ wzmacniacza o pomijalnie małej rezystancji wejściowej i będzie właściwie dobrany typ wzmacniacza o małych prądach polaryzacji wejść. Został tu zastosowany układ wzmacniacza o konfiguracji odwracającej fazę, zwany też wzmacniaczem inwersyjnym [34], który stanowi przetwornik prądu na napięcie o pomijalnej rezystancji wejściowej, co zapewnia silne ujemne, równoległe do wejścia, prądowe sprzężenie zwrotne zastosowane w układzie tego wzmacniacza.

Dla układu tego równanie opisujące prąd wejściowy wzmacniacza I_{we} ma postać następującą:

$$I_{we} = U_o \sum_{k=1}^{k=n} G_k \quad (3.5)$$