

INSTRUKCJE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH

dla specjalności pomiary technologiczne
i biomedyczne

CZŁOWIEK – NAJLEPSZA INWESTYCJA



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Naczelny Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:

*Tomasz Szmuc (przewodniczący), Marek Capiński, Jerzy Klich, Witold K. Krajewski,
Tadeusz Sawik, Mariusz Ziółko*

Recenzenci: *prof. dr hab. inż. Janusz Gajda*
dr hab. inż. Paweł Gryboś, prof. nadzw. AGH

Projekt okładki serii: *Barbara Jezierska*

Przygotowanie do druku okładki i stron tytułowych: *Zofia Łucka*

Skład komputerowy wykonany przez autorów

Druk z pliku dostarczonego przez autorów

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
ISBN 978-83-7464-350-4

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Egzemplarz bezpłatny

Redakcja Wydawnictw AGH
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel.: 12 617 32 28, tel./faks: 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
<http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl>

Spis treści

Wstęp	9
1. Biopomiary	11
Ćw. 1 Podstawowe pomiary medyczne	13
Ćw. 2 Pomiary czynności mechanicznej układu oddechowego	19
Ćw. 3 Elektromiografia	27
Ćw. 4 Fotopletyzmiografia, pulsoksymetria.....	32
Ćw. 5 Chromatografia	38
Ćw. 6 Spektrofotometria UV – Vis	43
Ćw. 7 Pomiary termograficzne.....	47
Ćw. 8 Pomiary pH, konduktometryczne, lepkości	51
2. Zintegrowane czujniki pomiarowe	55
Ćw. 1 Podstawy programowania w środowisku LabVIEW	57
Ćw. 2 Zastosowanie środowiska LabVIEW do akwizycji danych pomiarowych	61
Ćw. 3 Symulowanie wyjść zintegrowanych czujników pomiarowych	66
Ćw. 4 Odbiornik GPS.....	70
Ćw. 5 Czujnik przyspieszenia	74
Ćw. 6 Hallotronowy czujnik prądu	77
Ćw. 7 Zintegrowany czujnik wilgotności i temperatury	86
Ćw. 8 Czujniki ciśnienia	96
Ćw. 9 Inteligentny czujnik wiatru	103
3. Wirtualne systemy kontrolno-pomiarowe	113
Ćw. 1 Akwizycja danych pomiarowych.....	115
Ćw. 2 Komunikacja z przyrządami pomiarowymi	121
Ćw. 3 Projekt aplikacji w systemie czasu rzeczywistego	126
Ćw. 4 Wykorzystanie układu FPGA w aplikacji kontrolno-pomiarowej	132
Ćw. 5 Wykorzystanie mobilnego urządzenia PDA dla aplikacji kontrolno-pomiarowych.....	137
Ćw. 6 Wykorzystanie procesora sygnałowego dla aplikacji kontrolno-pomiarowych.....	142
Ćw. 7 Wykorzystanie kamery w systemie kontrolno-pomiarowym.....	148

4. Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych	153
Ćw. 1 Badanie właściwości metrologicznych komputerowego systemu akwizycji danych pomiarowych z wykorzystaniem uniwersalnej karty pomiarowej i oprogramowania DasyLab	155
Ćw. 2 Budowa i konfigurowanie systemu do pomiaru parametrów klimatycznych z wykorzystaniem karty pomiarowej i oprogramowania DasyLab	163
Ćw. 3 Pomiar temperatury za pomocą czujników termoelektrycznych i termorezystancyjnych z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych w magistrali szeregowej RS485	170
Ćw. 4 Pomiary przyspieszeń w ruchu drgającym	177
Ćw. 5 Projekt i realizacja tensometrycznych przetworników pomiarowych siły i masy z wykorzystaniem belki giętej i przemysłowego panelu wzmacniacza tensometrycznego MVD2555	183
Ćw. 6 Badanie właściwości metrologicznych toru pomiarowego z modulacją AM przeznaczonego do współpracy z czujnikami wielkości nieelektrycznych	191
Ćw. 7 Wyznaczenie charakterystyk metrologicznych laserowych czujników przemieszczenia liniowego, cyfrowych czujników kąta oraz czujników przyspieszenia	198
Ćw. 8 Badanie właściwości metrologicznych bezstykowego, pirometrycznego przetwornika pomiarowego temperatury	207
5. Wizualizacja w systemach biomedycznych	217
Ćw. 1 Postrzeganie oraz percepcja obrazu	219
Ćw. 2 Prezentacja danych jedno i wielowymiarowych	223
Ćw. 3 Wizualizacja danych w programie ParaView	229
Ćw. 4 Objętościowa prezentacja danych medycznych - program VolView	236
Ćw. 5 Wprowadzenie do biblioteki Visualization Toolkit	239
6. Analiza sygnałów biomedycznych	243
Ćw. 1 Sygnały dyskretne. Splot dyskretny i widmo sygnału dyskretnego	245
Ćw. 2 Projektowanie filtrów analogowych. Projektowanie rekursywnych filtrów cyfrowych IIR	252
Ćw. 3 Projektowanie nierekursywnych filtrów cyfrowych FIR. Filtracja sygnałów cyfrowych.	255
Ćw. 4 Metody obliczania DFT. Analiza częstotliwościowa z wykorzystaniem DFT.	260
Ćw. 5 Zmiana częstotliwości próbkowania sygnałów cyfrowych. Dyskretny sygnał analityczny. Dyskretna transformacja falkowa DWT	272
Ćw. 6 Filtry adaptacyjne. Kompresja sygnałów.	278
Ćw. 7 Filtracja obrazów. DFT i DWT obrazów.	282
Ćw. 8 Transformacja Radona.	289

7. Pomiary parametrów ruchu drogowego	293
Ćw. 1 Badanie właściwości systemu radarowego przeznaczonego do pomiarów parametrów pojazdów	295
Ćw. 2 Czujnik laserowy w pomiarach parametrów pojazdów	304
Ćw. 3 Czujniki magnetyczne w pomiarach parametrów ruchu drogowego	310
Ćw. 4 Pomiary parametrów pojazdów z wykorzystaniem systemu Raktel-8000...	319
Ćw. 5 Wyznaczanie charakterystyk ruchu drogowego.....	325
Ćw. 6 Zastosowanie czujników indukcyjnych pętlowych w pomiarach parametrów pojazdów.....	337
Ćw. 7 Ważenie pojazdów w ruchu - metody i algorytmy	342
8. Urządzenia elektroniki spinowej.....	349
Ćw. 1 Badania elementów elektroniki spinowej na przykładzie zaworu spinowego GMR i złącza tunelowego TMR – pomiar podstawowych charakterystyk elektrycznych i magnetycznych.....	351
Ćw. 2 Komercyjne czujniki magnetorezystancyjne typu: AMR, GMR i TMR - pomiary charakterystyk.....	358
Ćw. 3 Pomiary pola magnetycznego z użyciem czujnika AMR/GMR	369
Ćw. 4 Pomiary natężenia prądu elektrycznego z użyciem czujnika GMR	379
Ćw. 5 Pomiary przemieszczenia z użyciem czujnika AMR.....	387
Ćw. 6 Pomiary kąta z użyciem czujnika TMR	393
Ćw. 7 Symulacje numeryczne charakterystyk czujników magnetorezystancyjnych.....	398

Wstęp

Oddajemy w Państwa ręce zbiór instrukcji do ćwiczeń laboratoryjnych z ośmiu wybranych przedmiotów, zawartych w planie studiów specjalności *Pomiary technologiczne i biomedyczne*. Jest to specjalność prowadzona przez Katedrę Metrologii na drugim stopniu studiów, w ramach kierunku Elektrotechnika na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie.

Idea utworzenia specjalności o takim „nieelektrycznym” charakterze wynika z naszego głębokiego przekonania, że metrologia jest nauką interdyscyplinarną oraz ze świadomości istniejącego zapotrzebowania na dobrze wykształconą, posiadającą rozległą wiedzę, młodą kadrę metrologów.

Rozwój techniki i technologii stawia przed metrologami nowe wyzwania, którymi są: rozszerzanie zbioru wielkości mierzalnych, podnoszenie dokładności wykonywanych pomiarów, konstrukcja nowych narzędzi pomiarowych oraz opracowywanie nowych metod pomiarowych np. metod pomiarów nieinwazyjnych w diagnostyce medycznej bądź budowa bezprzewodowych sieci czujników w celu monitorowania rozległych obszarów lub obiektów.

Duża dostępność nowoczesnych narzędzi pomiarowych, działających w wielu przypadkach w sposób półautomatyczny, stwarza wrażenie, że każdy, kogo stać na zakup takiego urządzenia, może zostać metrologiem. Przekonanie to jest równie fałszywe, co powszechne. Poprawne przeprowadzenie pomiarów wymaga bowiem nie tylko bardzo dobrej znajomości narzędzia i realizowanej przez nie metody pomiarowej, ale również znajomości obiektu pomiarów i zachodzących w nim zjawisk. Ta wiedza warunkuje świadome używanie narzędzi pomiarowych. Nadrzędnym celem naszych działań jest zbudowanie platformy dydaktycznej umożliwiającej zdobycie takiej właśnie wiedzy, a rolę tej platformy powinna pełnić w naszym przekonaniu utworzona specjalność *Pomiary technologiczne i biomedyczne*.

Tom, który oddajemy w Państwa ręce zawiera instrukcje tylko do ośmiu spośród 17 przedmiotów prowadzonych w ramach specjalności, gdyż traktujemy to przedsięwzięcie jako swoisty eksperyment. Jesteśmy ciekawi Państwa oceny, w jakim stopniu taki materiał, przeznaczony do samodzielnego wykorzystania np. w ramach przygotowań do zajęć, jest przydatny i pomocny. Z dużym zaciekawieniem oczekujemy na Państwa opinie.

Autorzy

BIOPOMIARY

opracował

dr inż. Andrzej Skalski

Ćwiczenie 1

Podstawowe pomiary medyczne

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze stanowiskiem pomiarowym,
2. Pomiar ciśnienia krwi i tętna,
3. Pomiar EKG,
4. Pomiar rezystancji skóry.

Zakres wymaganych wiadomości

Metody pomiaru ciśnienia tętniczego krwi, tony Korotkowa, źródła błędów przy pomiarze ciśnienia, schemat blokowy urządzenia do pomiaru ciśnienia tętniczego krwi metodą oscylometryczną, pomiar rezystancji skóry, metody oraz zastosowania pomiaru rezystancji skóry, pomiar EKG, zakłócenia w pomiarze EKG, wymagania, które musi spełniać układ do pomiaru biopotencjałów.

Literatura

- [1] P. Augustyniak. *Przetwarzanie sygnałów elektrodiagnostycznych*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2001.
- [2] (p. red.) W. Torbicz, L. Filipczyński, R. Maniewski, M. Nałęcz, E. Stolarski. *Biopomiary*. Seria: Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, tom II, Wydawnictwa EXIT, 2001.
- [3] D. Zmarzły. *Pomiary elektrycznych wielkości medycznych*. Skrypt Nr 268, Politechnika Opolska, Opole, 2005.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się ze stanowiskiem pomiarowym

Stanowisko pomiarowe wyposażone jest w system do pomiaru EKG, ciśnienia oraz rezystancji skóry. Podłączenie urządzenia do komputera przeprowadza się przy użyciu interfejsu USB. Instrukcja obsługi oprogramowania znajduje się na stanowisku pomiarowym.

Otrzymane w czasie eksperymentów wyniki pomiarów nie mają wartości w sensie medycznym i nie powinny być wykorzystywane w monitorowaniu zdrowia pacjenta.

Ad 2. Pomiar ciśnienia krwi i tętna

W praktyce rozróżnia się dwie główne grupy metod pomiaru ciśnienia krwi:

- metoda bezpośrednia; jest to inwazyjna metoda, polegająca na umieszczeniu igły lub cewnika w świetle tętnicy i połączeniu ich z kalibrowanym przetwornikiem ciśnienia,
- grupa metod pośrednich; nieinwazyjnych i bezkrawych, polegających na wywieraniu przez mankiety zmiennego ciśnienia na zewnętrzną ściankę tętnicy tak długo, aż dojdzie do zrównania się ciśnienia w mankiecie z ciśnieniem wewnątrz tętnicy.

Pośrednia metoda pomiaru ciśnienia tętniczego krwi występuje w dwóch odmianach, w zależności od tego, czy pomiar wykonywany jest na podstawie całkowitego zamknięcia tętnicy, czy w czasie ciągłego przepływu krwi przez tętnicę. Kryterium całkowitego zamknięcia tętnicy polega na napompowaniu mankieta powyżej ciśnienia skurczowego; następnie obniżając stopniowo ciśnienie powietrza w mankiecie staramy się różnymi sposobami (w zależności od metody pomiaru) ustalić moment ponownego przepływu krwi poniżej uciskającego mankieta.

Wykonanie pomiarów:

W ramach zajęć należy dokonać pomiaru ciśnienia przy użyciu stetoskopu następnie te wyniki porównać z wynikami uzyskanymi metodą elektroniczną.

Pomiar ciśnienia tętniczego krwi metodą oscylometryczną i tętna za pomocą przyrządu firmy CASSY: zgodnie z instrukcją stanowiskową należy uruchomić program do rejestracji sygnałów z urządzenia. Program został przygotowany wyłącznie w celu demonstracji i zilustrowania sposobu pomiaru ciśnienia tętniczego krwi, przy użyciu metody oscylometrycznej.

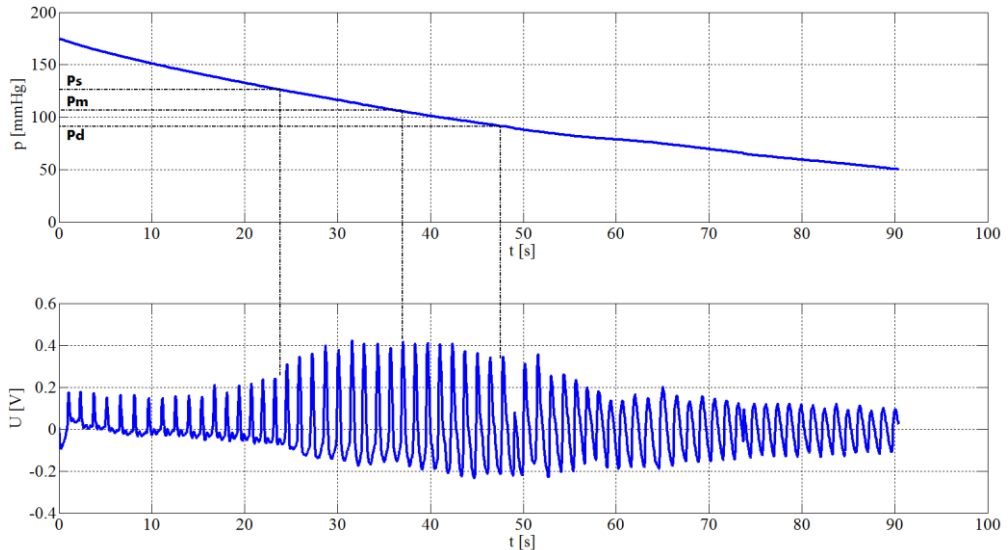
W celu wykonania pomiaru należy połączyć mankiety ciśnieniowy wraz z zaworem i gruszką do pompowania powietrza z przystawką pomiaru ciśnienia przyłączoną do wejścia A stacji pomiarowej CASSY. Zawór w gruszce powinien być w połowie otwarty, tzn. powinien być ustawiony mniej więcej w środkowej części, między całkowitym zamknięciem, a pełnym otwarciem. Mankiet trzeba założyć na gołą, lewą rękę tak, aby jego dolna krawędź znajdowała się 2-3 cm powyżej łokcia. Gumowa rurka wychodząca z mankieta musi znajdować się po wewnętrznej stronie ramienia, w obszarze tętnicy i kierować się w stronę dłoni. Metalowa płytką nie może leżeć bezpośrednio na arterii, ponieważ może to zafałszowywać wyznaczenie krzywej ciśnienia. Mankiet powinien dobrze przylegać do ramienia, ale nie powinien wywierać na niego dużego nacisku, do momentu aż zaczniemy pompować do niego powietrze. Osoba badana powinna znajdować się w pozycji siedzącej. Rozluźnione i lekko zgięte ramię powinno leżeć na stole.

Następnie należy uruchomić pomiar. Ramię z mankiem nie może się ruszać podczas dokonywania pomiaru! Kiedy amplituda oscylacji osiągnie stałą wartość po pewnej liczbie

pulsów, pomiar może zostać przerwany. Powietrze może zostać całkowicie wypompowane z mankietu, poprzez naciśnięcie czerwonego przycisku na zaworze gumowej gruszki.

Przerwa pomiędzy kolejnymi pomiarami, wykonywanymi na tym samym pacjencie musi trwać przynajmniej 2 min. Różnice wartości ciśnienia w kolejnych pomiarach są normalnym zjawiskiem. Podstawową wartością mierzoną w metodzie oscylometrycznej, w związku z dużą pewnością jej wyznaczenia jest wartość średniego ciśnienia tętniczego (**Pm**). Zwykle jest ona wyznaczana na podstawie maksymalnej wartości amplitudy wyznaczonej z minimum 5 oscylacji. Istnieją różne algorytmy wyznaczenia ciśnień skurczowego i rozkurczowego w tej metodzie. Jako przykład można podać metodę, która wyznacza wartość skurczową (**Ps**), jako ciśnienie w mankiecie w czasie odpuszczania, przed wystąpieniem maksymalnych oscylacji, przy którym amplituda tychże oscylacji równa jest 50% amplitudy maksymalnej. Analogicznie jako wartość rozkurczowa przyjmowane jest ciśnienie odpowiadające 75% amplitudy maksymalnej (rys. 1).

W sprawozdaniu należy zamieścić otrzymane wyniki oraz wartości ciśnienia skurczowego, rozkurczowego, średniego oraz wartość częstotliwości tętna.



Rys. 1. Przykład zarejestrowanych sygnałów podczas pomiaru ciśnienia metodą oscylometryczną oraz metoda wyznaczenia ciśnienia skurczowego (**Ps**), rozkurczowego (**Pd**) oraz średniego (**Pm**).

Ad 3. Pomiar EKG

Pomiar EKG jest nieinwazyjną metodą oceny elektrycznej aktywności serca. Umożliwia podstawową diagnostykę między innymi w przypadku tak zwanych „bólów w klatce” oraz zaburzeń rytmu.

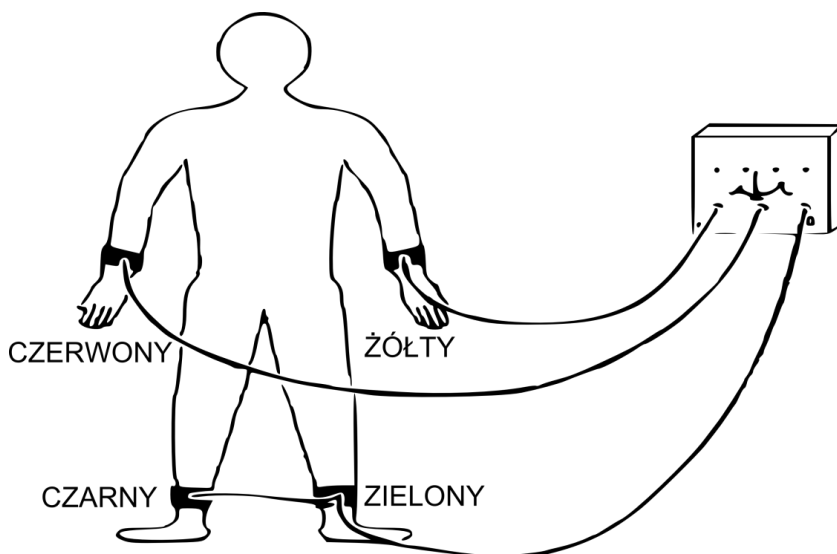
Wykonanie pomiarów:

Podłączenie elektrod: elektrody umieszczamy na ciele badanego: prawa i lewa ręka, lewy i prawy goleń. Trzy pierwsze elektrody (umieszczone na lewej ręce, prawej ręce oraz lewym goleniu) tworzą tzw. trójkąt Einthoven'a, który w założeniu jest trójkątem równobocznym, w wyniku czego linie prowadzone prostopadłe z każdego ze środków trzech boków, reprezentujące zerowy potencjał, przetną się w środku trójkąta.

Odprowadzenie I – różnica potencjałów pomiędzy elektrodami: lewa i prawa ręka.

Odprowadzenie II – różnica potencjałów pomiędzy elektrodą lewa goleń, a elektrodą na prawej ręce.

Odprowadzenie III – różnica potencjałów pomiędzy elektrodą lewa goleń, a elektrodą na lewej ręce.



Rys. 2. Sposób podłączenia według metody Einthoven'a.

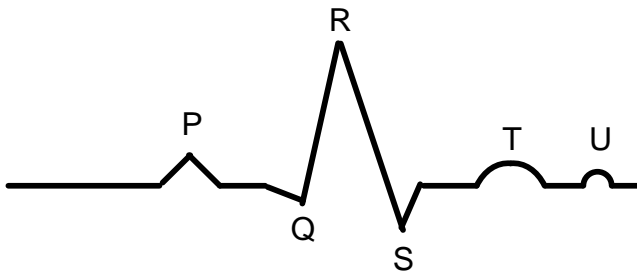
Po podłączeniu elektrod należy zarejestrować sygnały EKG dla wszystkich odprowadzeń, przed i po wysiłku. Instrukcja obsługi oprogramowania znajduje się na stanowisku pomiarowym. Po zarejestrowaniu sygnałów proszę wyznaczyć chwilowe położenie wektora serca. W tym celu można wykorzystać metodę przedstawioną na rysunku 3.

Na przygotowanym wcześniej trójkącie równobocznym, na którym należy opisać okrąg (rys. 3), nanosimy podziałkę analogicznie jak na rysunku. Następnie, wartości załamka R (rys. 4) w kolejnych odprowadzeniach odmierzamy i umieszczamy na bokach trójkąta. Załamek R może zostać rozpoznany jako pierwsze dodatnie wychylenie elektrokardiogramu. Po naniesieniu wektorów wykonujemy rzutowanie, co w konsekwencji pozwala wyznaczyć położenie i wartość poszukiwanego wektora.

Następnie, należy wyznaczyć czas jednego cyklu pracy serca jako odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi załawkami R.



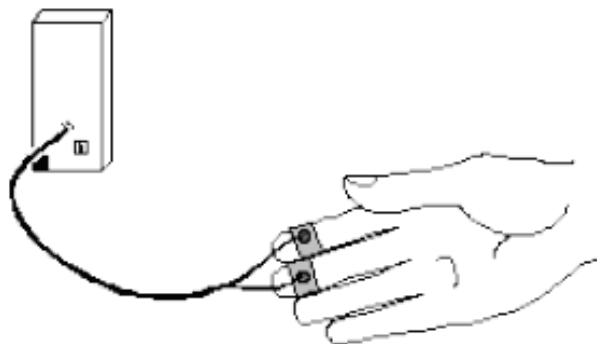
Rys. 3. Metoda wyznaczenia chwilowego położenia wektora serca.



Rys. 4. Krzywa EKG z zaznaczonymi załamkami.

Ad 4. Pomiar rezystancji skóry

W czasie zajęć posługujemy się modulem CASSY-E 524 048 wraz ze współpracującą z nim stacją bazową oraz oprogramowaniem.



Rys. 5. Sposób podłączenia czujników w pomiarze rezystancji skóry.

Rezystancja skóry jest podatna na zmiany związane z czynnikami zewnętrznymi. Urządzenie może być wykorzystane np. do obserwowania efektu treningu autogenicznego (technika relaksacji neuromięśniowej, polegająca na wywołaniu poprzez autosugestię doznań podobnych do stanu hipnozy) lub obserwacji efektu zaskoczenia.

Podczas zajęć proszę zarejestrować przebieg zmian konduktancji wraz z adnotacją o ewentualnych zmianach czynników zewnętrznych wpływających na osobę badaną podczas pomiarów (np. przestraszenie osoby badanej).

Wykaz aparatury

1. Baza CASSY,
2. Moduły: EKG, pomiar ciśnienia, pomiar rezystancji skóry,
3. Komputer PC z monitorem.

Ćwiczenie 2

Pomiary czynności mechanicznej układu oddechowego

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze stanowiskiem pomiarowym,
2. Badanie spirometryczne,
3. Badanie przepływ – objętość,
4. Badanie MVV,
5. Badanie NEP,
6. Procedura mycia, dezynfekcji głowic pneumotachograficznych i ustników,
7. Kapnografia.

Zakres wymaganych wiadomości

Metody pomiaru przepływu, czujniki ciśnienia, budowa spirometru, podstawowe parametry wyznaczone podczas badań spirometrycznych, mechaniczne właściwości układu oddechowego oraz ich fizyczna interpretacja.

Literatura

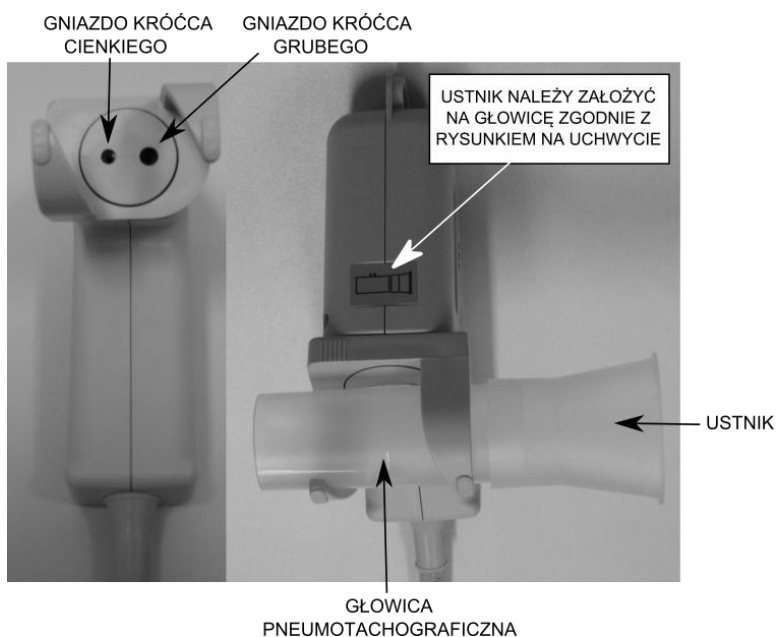
- [1] *Instrukcja obsługi spirometru LUNGTEST*. System Lungtest, MES, www.mes.com.pl.
- [2] *Instrukcja obsługi spirometru LUNGTEST. Instrukcja posługiwania się programem*: System Lungtest, MES, www.mes.com.pl.
- [3] J. Gajda. *Biopomiary*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [4] J. Kowalski, A. Koziorowski, L. Radwan. *Ocena czynności płuc w chorobach układu oddechowego*. Borgis, 2004.
- [5] (p. red.) K. Kuziemski, Ewa Jassem: *Ocena czynności układu oddechowego w codziennej praktyce lekarskiej*. VIA MEDICA, 2005.
- [6] P. Piwowar. *Pomiar mechanicznych parametrów dróg oddechowych metodą wymuszania krótkotrwałych, ujemnych impulsów ciśnienia*. Rozprawa doktorska, 2006, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9767/full9767.pdf>.
- [7] B. Juroszek. *Metrologiczne aspekty badania czynności mechanicznej układu oddechowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [8] *Zalecenia Polskiego Towarzystw Ftyzjopneumonologicznego dotyczące wykonywania badań spirometrycznych*, <http://www.igichp.edu.pl/uzup/pochp/htmlspiro/index.htm>.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się ze stanowiskiem pomiarowym

Stanowisko pomiarowe do badań spirometrycznych wyposażone jest w spirometr LUNGTEST 1000SB będący stacjonarnym urządzeniem do badań czynnościowych układu oddechowego. Składa się z trzech zasadniczych elementów: modułu pomiarowego, komputera z drukarką oraz pakietu oprogramowania. Dodatkowo stanowisko wyposażone jest w kompresor, który jest częścią składową systemu do pomiaru NEP (*Negative Expiratory Pressure*).

Zadaniem modułu pomiarowego jest przetworzenie parametrów ciśnienia oraz przepływu wdychanego i wydychanego przez pacjenta powietrza na sygnały elektryczne, przesyłane za pomocą interfejsu RS232, rejestrowane i przetwarzane w komputerze. W skład modułu wchodzi następujące elementy: głowica pneumatograficzna, czujnik przepływu, czujnik ciśnienia. Sposób montażu głowicy oraz ustnika w uchwycie do pomiaru spirometrycznego oraz badania przepływ-objętość przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Od lewej: Uchwyt do głowicy pneumatograficznej; Uchwyt z zamontowaną głowicą oraz ustnikiem.

Po zmontowaniu systemu pomiarowego zgodnie z rysunkiem 1 należy uruchomić program Lungtest 1000. Instrukcja obsługi programu oraz spirometru znajduje się na stanowisku pomiarowym.

Ad 2. Badanie spirometryczne

W celu wykonania badania spirometrycznego należy zapoznać się z instrukcją programu obsługującego spirometr LUNGTEST 1000, umieszczoną na stanowisku pomiarowym.

Osoba badana oddycha przez ustnik i głowicę pneumotachograficzną (rys. 1). Po wykonaniu minimum 6 spokojnych oddechów należy wykonać spokojnie, maksymalnie głęboki wdech i również powoli maksymalnie głęboki wydech. Po zakończeniu manewru należy dalej oddychać swobodnie przez układ pomiarowy.

Pomiary wykonywane są w grupach dwuosobowych. Jedna osoba wykonuje badanie, natomiast druga wydaje polecenia osobie badanej, zgodnie z komunikatami pojawiającymi się w programie (lewy dolny róg monitora). Podstawowe parametry wyznaczone podczas badania przedstawiono w tabeli 1. Obrazowo zostały one zaprezentowane na rysunku 2. Pozostałe parametry nie opisane w instrukcji można znaleźć w [1, 8].

Tabela 1

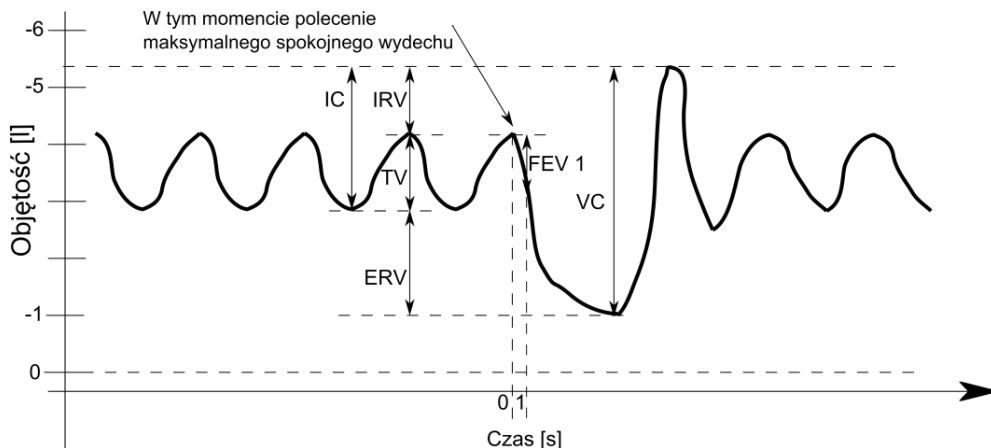
Podstawowe parametry wyznaczone podczas badania spirometrycznego.

Nazwa param.	Opis
VC	(<i>Vital Capacity</i>) – Pojemność życiowa płuc: największa zmiana pojemności płuc mierzona pomiędzy maksymalnym wydechem a maksymalnym wdechem. Jednostka: [dm ³]
IC	(<i>Inspiratory Capacity</i>) – Pojemność wdechowa płuc: największa ilość powietrza wciągnięta do płuc podczas powolnego wdechu z poziomu spokojnych wydechów do szczytu największego wdechu. Jednostka: [dm ³]
ERV	(<i>Expiratory Reserve Volume</i>) – Wydechowa objętość zapasowa, największa objętość powietrza, która może być wydmuchana z płuc po zakończeniu spokojnego wydechu. Jednostka: [dm ³]
IRV	(<i>Inspiratory Reserve Volume</i>) – Wdechowa objętość zapasowa, największa objętość powietrza, która może być wciągnięta do płuc po zakończeniu spokojnego wdechu. Jednostka: [dm ³]
TV	(<i>Tidal Volume</i>) – Objętość pojedynczego oddechu: objętość powietrza wciągane do płuc i wydmuchiwanego podczas wydechu w czasie spoczynkowego, spokojnego, jednostajnego oddychania. Jednostka: [dm ³]
FEV 1	(<i>Forced Expiratory Volume in 1 second</i>) – Jednosekundowa objętość forsownego wydechu: Największa objętość gazu jaką można wydmuchać z płuc w czasie 1 sekundy. Jednostka: [dm ³]
MV	(<i>Minute Ventilation</i>) – Objętość wentylacji minutowej: ilość gazu wentylowanego przez płuca w czasie jednej minuty. Jednostka: [dm ³ /min]

Badanie spirometrii uznaje się za prawidłowo wykonane jeżeli spełnione są następujące warunki:

- osoba badana oddychała spokojnie i w żadnym momencie nie było elementów natężonego oddechu, ale równocześnie oddech nie był „nienormalnie” wolny ponieważ może to doprowadzić do przeszacowania wartości VC,
- osoba badana wykonuje kilka, około 5-6 spokojnych oddechów przed manewrami, w których wyznacza się: VC, IC, ERV,

- polecenie wykonania spokojnego wydechu musi nastąpić na początku spokojnego wydechu (patrz: rys. 2),



Rys. 2. Przykładowy spirogram.

- należy wykonać minimum trzy poprawne testy spirometrii wolnej. Maksymalna liczba prób nie powinna przekraczać 4, tzn. po czwartej próbie zaleca się przerwanie badania; przerwa powinna wynosić co najmniej 1 min.,
- spokojny maksymalny wdech i wydech powinny się odbyć przy relatywnie stałym przepływie, dla zdrowej osoby poziomy maksymalne osiągnęte są w czasie 5-6 sekund; manewr maksymalnego wdechu lub wydechu jest uznawany za prawidłowy w momencie uzyskania *plateau* (komunikat programu),
- uzyskanie *plateau* na końcu maksymalnego wdechu i wydechu jest warunkiem otrzymania prawdziwych i powtarzalnych wartości: VC, IC, ERV,
- spirometria jest wykonana prawidłowo, jeżeli różnica pomiędzy dwiema maksymalnymi, uzyskanymi wartościami VC jest mniejsza niż 150 ml.

Ad 3. Badanie przepływ – objętość

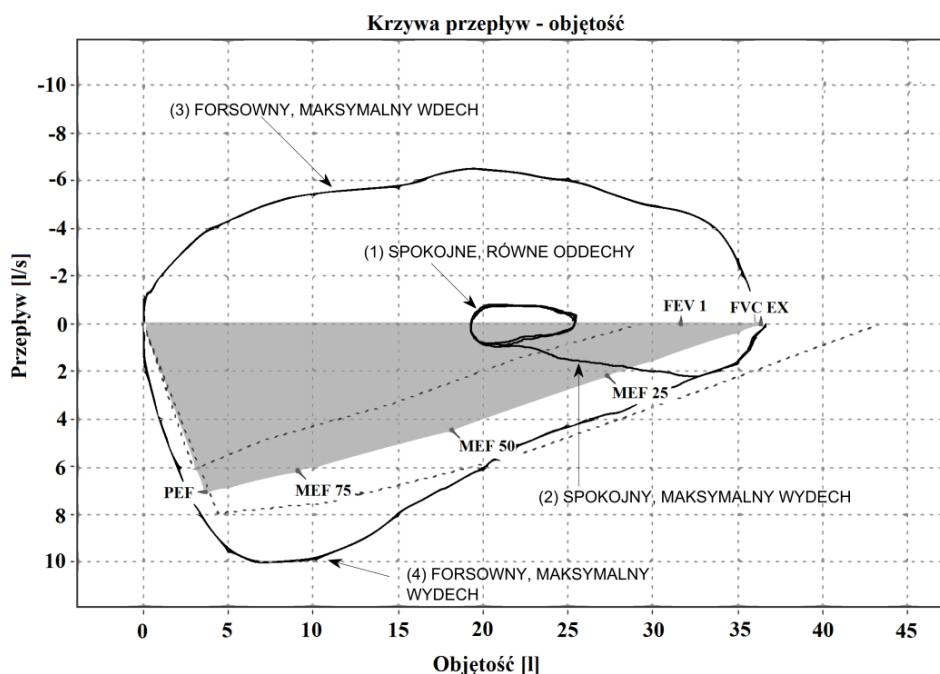
Badanie mające na celu wyznaczenie krzywych przepływ – objętość wykonuje się w następujących etapach: 1) osoba badana wykonuje spokojne, równe, stabilne oddechy; 2) na początku spokojnego wydechu polecamy osobie badanej wykonanie maksymalnego wydechu do poziomu objętości zalegającej; 3) osoba badana wykonuje forsowny, maksymalny wdech o wartości FVC IN; 4) osoba badana wykonuje forsowny, maksymalny wydech o wartościach FVC EX; po wydechu w płucach pozostaje jedynie objętość zalegająca.

Osoba wydająca polecenia powinna śledzić komunikaty pojawiające się w programie, informujące o momentach rozpoczęcia poszczególnych manewrów.

Najważniejsze parametry wyznaczone z krzywej przepływ-objętość przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 2.

Tabela 2
Podstawowe parametry wyznaczane z krzywej przepływ-objętość.

Nazwa param.	Opis
FVC	(<i>Forced Vital Capacity</i>) - Natężona pojemność życiowa: największa objętość powietrza wydmuchnięta przy maksymalnym wysiłku wydechowym po uprzednim możliwie największym wdechu. Jednostka: [dm ³]
FVC IN	(<i>Forced Inspiratory Vital Capacity</i>) – Forsowna wdechowa pojemność życiowa: maksymalna ilość powietrza jaką można wciągnąć do płuc w czasie mocnego i dynamicznego wdechu, od pozycji jak najgłębszego wydechu do najgłębszego wdechu. Jednostka: [dm ³]
FVC EX	(<i>Forced Expiratory Vital Capacity</i>) – Forsowna wydechowa pojemność życiowa płuc: maksymalna ilość powietrza jaką można wydmuchać z płuc w czasie mocnego i dynamicznego wydechu, od pozycji jak najgłębszego wdechu do najgłębszego wydechu. Jednostka: [dm ³]
PEF	(<i>Peak Expiratory Flow</i>) – Szczytowy przepływ wydechowy: Największy przepływ jaki można osiągnąć podczas forsownego wydechu po uprzednim największym wdechu. Jednostka: [dm ³ /s]
MEF 25	(<i>Maximal Expiratory Flow AT 25% FVC</i>) – Maksymalny przepływ wydechowy w momencie, gdy do końca forsownego wydechu pozostało jeszcze 25% FVC. Jednostka: [dm ³ /s]



Rys. 3. Przykładowa krzywa przepływ – objętość.

Kryteria prawidłowej współpracy i akceptowalności badania natężonej krzywej przepływ – objętość można znaleźć w [1].

Ad 4. Badanie MVV

Osoba badana oddycha przez ustnik i głowicę pneumotachograficzną (analogicznie jak w badaniu spirometrycznym). W badaniu wyróżnia się dwie fazy: fazę spoczynkową oraz fazę MVV. W pierwszej fazie osoba badana oddycha swobodnie, natomiast w ściśle określonym czasie fazy drugiej (komunikat w programie), oddycha maksymalnie szybko i głęboko. Badanie kończy się wraz z zakończeniem fazy drugiej. Parametry wyznaczone z badania MVV przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3
Parametry wyznaczone w badaniu MVV.

Nazwa param.	Opis
MVV	(<i>Maximal Voluntary Ventilation</i>) – Maksymalna wentylacja swobodna: największa objętość gazu jaką można przewentylować płuca w ciągu jednej minuty. Jednostka: [dm ³ /min]
BF MVV	(<i>Breathing Frequency Turing MVV</i>) – Częstość oddechów podczas badania MVV: liczba cykli oddechowych w jednostce czasu podczas badania MVV. Jednostka: [1/min]
BR	(<i>Breath Reserve</i>) – Rezerwa oddechowa: $\frac{MVV-MV}{MVV}$. Jednostka: [%]

Ad 5. Badanie NEP

Przed przystąpieniem do badania NEP należy skontrolować poziom skroplonej wody w kompresorze (rys. 4). W sytuacji, gdy poziom przekracza połowę należy zawiadomić prowadzącego ćwiczenia o konieczności usunięcia wody.



Rys. 4. Wskaźnik poziomu wody kompresora.

Aby wykonać badanie NEP należy zmontować system pomiarowy zgodnie z rysunkiem 5, oraz włączyć kompresor. Następnie w menu *Badanie* należy wybrać polecenie NEP. Procedurę badania można przedstawić w następujących punktach:

- skontroluj opcje badania ([2] rozdz. 12.2),
- wybierz polecenie *Rozpocznij badanie* z menu *Narzędzia*,
- rozpoczęcie badania:
 - osoba badana wykonuje 3-5 spokojnych oddechów (rozgrzewka),
 - następuje start badania,
 - osoba badana nadal spokojnie oddycha (każdy oddech jest rejestrowany i dodawany do okna z krzywymi badania). Liczba rejestrowanych spokojnych oddechów jest ustawiana w opcjach badania,
 - faza NEP, osoba badana kontynuuje spokojny oddech, lecz co ustaloną wcześniej liczbę oddechów (częstotliwość NEP) podawane jest ujemne ciśnienie. Liczba manewrów NEP w tej fazie jest 3 – krotnością liczby wyświetlanych krzywych ustawianych w opcjach badania.

Parametry wyznaczane można znaleźć w [2]. Sposób montażu systemu do pomiaru NEP przedstawiono na rysunku 5.

Po wykonaniu wszystkich badań otrzymane wyniki należy zapisać w formacie PDF lub wyeksportować do formatu *xls*.



Rys. 5. Fragment systemu pomiarowego do badania NEP. Sposób montażu przewodu od kompresora z głowicą pomiarową.

Ad 6. Procedura, mycia, dezynfekcji głowic pneumatograficznych i ustników

Po wykonaniu badania, ustnik, łączniki oraz głowicę pneumatograficzną należy umieścić w pojemniku z płynem myjącym w celu usunięcia białka, a następnie starannie przepłukać w zimnej wodzie. Pozbawione białka elementy umieścić w pojemniku z płynem

dezynfekcyjnym i pozostawić na czas minimum 6 godzin. Po wyjęciu z płynu dezynfekującego, głowicę i ustnik należy wypłukać w wodzie destylowanej.

UWAGA: Mycie i dezynfekcja akcesoriów połączonych na czas badania może być wykonywana tylko po ich wcześniejszym rozłączeniu.

Ad 7. Kapnografia

Kapnograf jest urządzeniem, które mierzy i wyświetla częstość oddechów oraz zawartość dwutlenku węgla w wydychanym powietrzu (EtCO_2). Kapnograf jest przeznaczony do nieinwazyjnego, ciągłego monitorowania tych parametrów w szpitalach i innych placówkach medycznych, w czasie opieki pooperacyjnej, w trakcie transportu pacjentów, podczas opieki w domu i w ratownictwie medycznym [3].

Podczas zajęć należy, za pomocą dołączonego oprogramowania (komunikacja RS 232) zarejestrować przykładowe pomiary obrazujące zawartość CO_2 oraz częstości oddechów.

Wykaz aparatury

1. Spirometr Lungtest 1000SB,
2. Kompresor,
3. Komputer PC z monitorem oraz drukarką,
4. Zestaw do dezynfekcji,
5. Oprzyrządowanie do pomiaru NEP,
6. Głowice pneumotachograficzne,
7. Ustniki,
8. Kapnograf wraz z oprogramowaniem.

Ćwiczenie 3

Elektromiografia

Program ćwiczenia

1. Kalibracja obwodu przedwzmacniacza,
2. Charakterystyka filtra pasmowo-zaporowego,
3. Charakterystyki filtra dolnoprzepustowego, górnoprzepustowego,
4. Obserwacja sygnałów na wyjściu prostownika 1-połówkowego oraz sekcji integratora,
5. Pomiary elektromiograficzne (EMG).

Zakres wymaganych wiadomości

Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe filtrów, fizjologia transmisji neuromięśniowej, aparatura elektromiograficzna.

Literatura

- [1] P. Augustyniak. *Przetwarzanie sygnałów elektrodiagnostycznych*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2001.
- [2] *Biomedical Measurement System KL 720 – Experiment Manual*. K&H MFG CO., LTD.
- [3] D. Zmarzły. *Pomiary elektrycznych wielkości medycznych*. Skrypt nr 268, Politechnika Opolska, 2005.

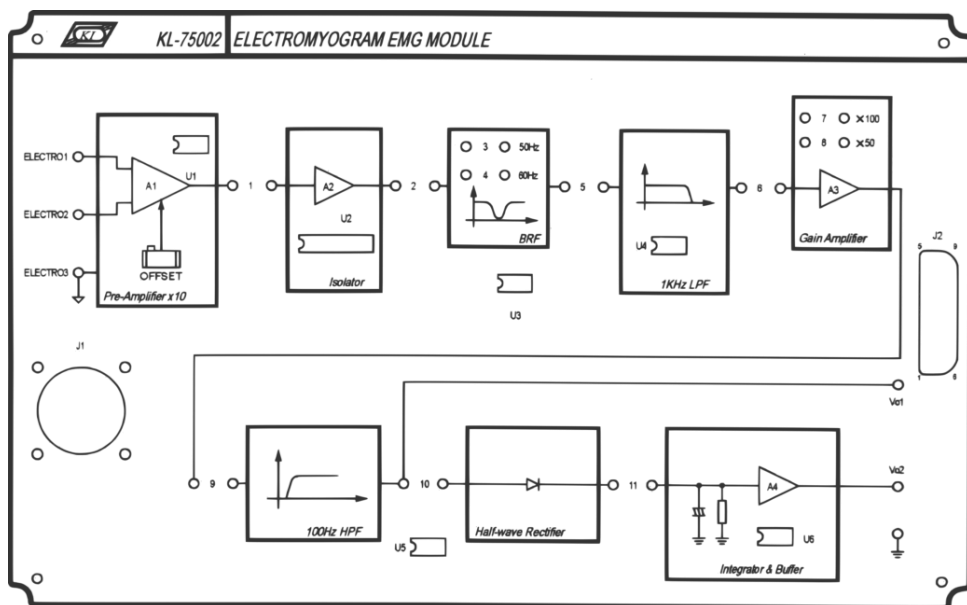
Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ćwiczenie pozwala poznać elektryczną aktywność mięśni w warunkach izotonicznych i izometrycznych z jednoczesną detekcją ich siły. Dodatkowo z uzyskanej w trakcie pomiaru krzywej studenci mogą określać funkcję ruchu określonych mięśni szkieletowych. Moduł służący do pomiaru EMG przedstawiono na rysunku 1.

Ad 1. Kalibracja obwodu przedwzmacniacza

W celu wykonania kalibracji obwodu przedwzmacniacza należy:

1. Zestawić obwód pomiarowy w następujący sposób:
 - Podłączyć *MODULE OUTPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu EMG krótkim przewodem RS232, zakończonym wtyczkami DB9.
 - Połączyć wejście *ELECTRO1* z *ELECTRO2* oraz *ELECTRO2* z *ELECTRO3* przewodami w bloku przedwzmacniacza (Pre-Amplifier x10).
2. Włączyć zasilanie.
3. Połączyć wejście HI multimetru cyfrowego skonfigurowanego do pomiaru napięcia stałego z wyjściowym gniazdem bloku przedwzmacniacza oraz wejście LO z gniazdem *ELECTRO3*.
4. Ustawić potencjometr *OFFSET* w taki sposób, aby napięcie wyjściowe wskazywane przez multimetr wynosiło 0V.
5. Wyłączyć zasilanie oraz rozłączyć układ.



Rys. 1. Widok modułu EMG [2].

Ad 2. Charakterystyka filtra pasmowo-zaporowego

Wyznaczenie charakterystyki filtra pasmowo-zaporowego jest możliwe po wykonaniu następującej procedury:

1. Zestawić obwód pomiarowy w następujący sposób:
 - Gniazdo *OUTPUT* w sekcji generatora funkcyjnego znajdującego się na module bazowym podłączyć do wejścia *CH1* znajdującego się w sekcji *SCOPE ADAPTOR*. Wyjście (BNC) *CH1* oraz *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* podłączyć odpowiednio do wejść oscyloskopu cyfrowego.

- Podłączyć *MODULE OUPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu EMG krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9.
 - Gniazdo *OUTPUT* generatora funkcyjnego połączyć z gniazdem *INPUT* w sekcji *BRF*.
 - Gniazdo *GND* w sekcji generatora funkcyjnego połączyć z gniazdem masy znajdującego się w prawym dolnym rogu modułu.
 - Połączyć gniazdo *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* z wyjściem z sekcji *BRF*.
 - W celu wyboru częstotliwości zaporowej (50 Hz) umieścić zworę w gnieździe 3.
2. Włączyć zasilanie.
 3. Ustawić w generatorze przebieg sinusoidalny o częstotliwości 1Hz oraz amplitudzie 0.5 V, następnie zaobserwować sygnał na kanale 1 oscyloskopu.
 4. Obserwować wyjście z bloku filtra pasmowo-zaporowego na kanale 2 oscyloskopu, zmierzyć amplitudę sygnału.
 5. Zanotować wartość amplitudy sygnału w kanale drugim.
 6. Nie zmieniając kształtu oraz amplitudy sygnału powtórzyć kroki 4 oraz 5 dla innych wartości częstotliwości (5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz).
 7. Uzyskane w punkcie 6 wyniki przedstawić w postaci charakterystyki amplitudy od częstotliwości.
 8. Wyłączyć zasilanie i rozłączyć układ.

Ad 3. Charakterystyki filtra dolnoprzepustowego, górnoprzepustowego

Charakterystyki filtra dolno- i górnoprzepustowego (1 kHz LPF, 100 Hz HPF) należy wyznaczyć w sposób analogiczny do procedury opisanej w punkcie drugim, pamiętając o odpowiednim podłączeniu sygnału z generatora do poszczególnych wejść sekcji badanych filtrów.

Ad 4. Obserwacja sygnałów na wyjściu prostownika 1-połówkowego oraz sekcji integratora

W celu zaobserwowania sygnałów na wyjściu prostownika 1-połówkowego (*Half-wave Rectifier*) należy zmontować układ w sposób analogiczny do punktu 2. Następnie w sekcji generatora funkcyjnego modułu bazowego proszę ustawić sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1kHz i wartości międzyszczytowej 1V.

Układ należy połączyć tak, aby możliwa była obserwacja sygnału na wyjściu sekcji prostownika oraz integratora. Przewód łączący wejście *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* z wyjściem z prostownika przepinamy na wyjście sekcji integratora. Dodatkowo należy umieścić zworę w pozycji 11 aby dokonać połączenia obydwu sekcji. Przebiegi rejestrujemy kolejno dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 5 Hz i 10 Hz oraz wartości międzyszczytowej 1V.

Ad 5. Pomiary Elektromiograficzne (EMG)

Pomiar EMG jest możliwy po podłączeniu wyjść elektromiogramu *Vo1* (*Vo2*) do gniazda *CH1* (*CH2*) w sekcji *SCOPE ADAPTOR* oraz gniazd BNC *CH1* oraz *CH2*

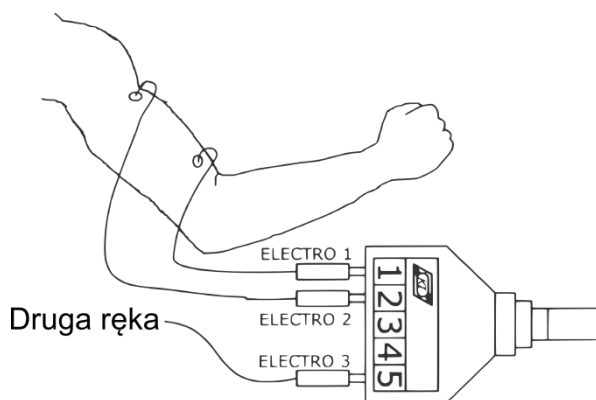
z wejściami oscyloskopu. Wyjście modułu (*MODULE OUTPUT*) jednostki bazowej należy połączyć przewodem z terminalem *J2* modułu EMG.

Połączenia wszystkich bloków modułu przeprowadza się umieszczając zwory w pozycjach 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11.

Wszystkie pomiary obserwujemy na ekranie oscyloskopu i/lub komputera. Obserwacja na ekranie komputera jest możliwa po podłączeniu wyjścia RS232 stacji bazowej z komputerem oraz po uruchomieniu oprogramowania KL-720.

UWAGA: Przed przystąpieniem do pomiarów należy usunąć z ręki badanej osoby zegarek oraz bransoletki itp.

Następnie umieszczamy elektrody na ręce osoby badanej zgodnie z rysunkiem 2. Dobór miejsca przyklejenia elektrod na rękę prawą można dokonać w następujący sposób: Osoba badana powinna stanąć w pozycji wyprostowanej, umieszczając prawą rękę wzdłuż ciała kierując palce do ziemi oraz dłoń przed siebie. Następnie umieszczamy w prawej ręce osoby badanej 5 kg ciężarek. Prosimy osobę o podniesienie ciężarka tak, aby uwypuklić mięśnie. Następnie w celu zmniejszenia rezystancji przecieramy alkoholem skórę w okolicach badanych mięśni (biceps) oraz przyklejamy dwie elektrody. Trzecią elektrodę umieszczamy na nadgarstku lewej ręki.



Rys. 2. Sposób mocowania elektrod [2].

Elektrody podłączamy do gniazda *J1* w module EMG. Następnie włączamy zasilanie oraz wybieramy *MODULE:KL-75002 (EMG)* przyciskiem *SELECT* na ekranie LCD.

1) Pomiary skurczów izometrycznych

- Osoba badana powinna stanąć w pozycji wyprostowanej, umieszczając rękę wzdłuż ciała dłonią skierowaną przed siebie.
- Obserwujemy czy sygnał w kanale drugim oscyloskopu jest stabilny, jeżeli nie jest, świadczy to o dużej impedancji pomiędzy elektrodą, a skórą. W takim wypadku konieczne jest przemycie alkoholem miejsca styku.
- Osoba badana ugina łokieć pod kątem 90 stopni, następnie umieszczamy w dłoni ciężarek na czas ok. 2 sekund (ręka nie powinna drżeć). Otrzymane przebiegi rejestrujemy.

2) Pomiary skurczów izotonicznych

- a) Powtarzamy punkt 1a oraz 1b.
- b) Osoba badana ugina łokieć pod kątem 90 stopni, następnie umieszczamy ciężarek, który powinien być podnoszony i opuszczany przez czas ok. 2-5 sekund. Pomiar powtarzamy 3 krotnie. Otrzymane przebiegi rejestrujemy.

3) Pomiary zmęczenia mięśni

- a) Powtarzamy punkt 1a.
- b) Osoba badana podnosi i opuszcza ciężarek do chwili, aż poczuje zmęczenie mięśni.

Zmieniając położenie zwory z pozycji 8 na 7 powtarzamy pomiary 1-3, aby zaobserwować wpływ zmiany wzmocnienia z 50 na 100.

Wszystkie zaobserwowane przebiegi oraz charakterystyki należy umieścić w sprawozdaniu.

Wykaz aparatury

- 1. Stacja bazowa,
- 2. Moduł do pomiarów EMG,
- 3. Komputer PC,
- 4. Oscyloskop,
- 5. Elektrody,
- 6. Przewody oraz zwory,
- 7. Ciężarek - 5 kg.

Ćwiczenie 4

Fotopletyzmografia, pulsoksymetria

Program ćwiczenia

1. Kalibracja czujnika podczerwieni,
2. Pomiary charakterystyk poszczególnych elementów toru pomiarowego,
3. Pomiary objętości naczyń krwionośnych,
4. Pomiary pulsoksymetryczne.

Zakres wymaganych wiadomości

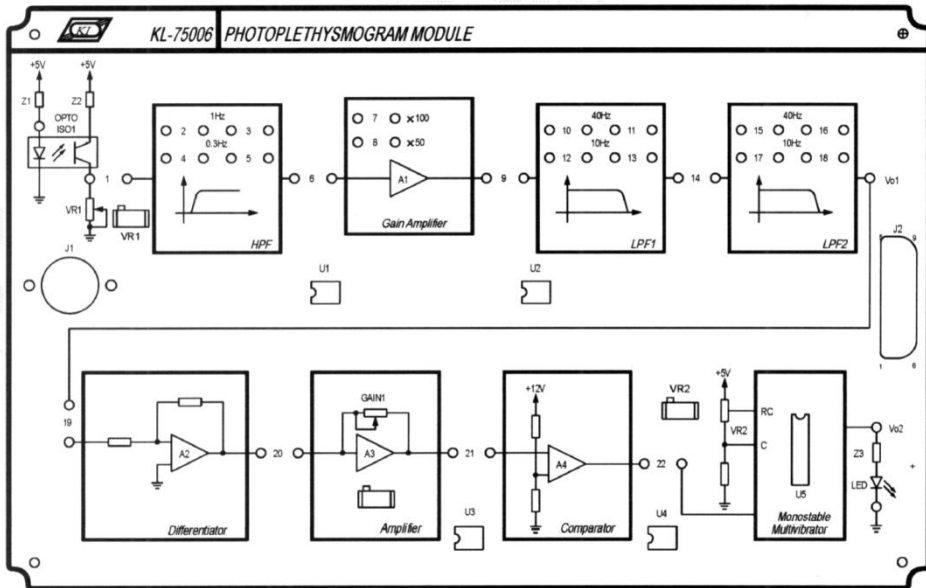
Zasada działania pulsoksymetru, czujnik podczerwieni, fototranzystor, schemat blokowy urządzenia do pomiarów fotopletyzmograficznych, pletyzmografia impedancyjna oraz optoelektroniczna.

Literatura

- [1] (p. red.) W. Torbicz, L. Filipczyński, R. Maniewski, M. Nałęcz, E. Stolarski. *Biopomiary*. Seria: Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, tom II, Wydawnictwa EXIT, 2001.
- [2] A. Cysewska-Sobusiak, Z. Krawiecki, G. Wiczyński, A. Odon. *Wykorzystanie w biopomiarach transmisyjnego wariantu światło-tkanki*. PAK 9 BIS 2007, str. 390-393
- [3] *Biomedical Measurement System KL 720 – Experiment Manual*. K&H MFG CO., LTD.
- [4] J. Gajda. *Biopomiary*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z nieinwazyjnymi metodami pomiaru objętości naczyń krwionośnych oraz saturacji. W ramach ćwiczenia będzie możliwość porównania objętości naczyń obwodowych przed i po wysiłku fizycznym. Moduł służący do pomiarów fotopletyzmograficznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok modułu fotopletyzograficznego [3].

Ad 1. Kalibracja czujnika podczerwieni

W celu wykonania kalibracji czujnika należy zamontować w jednostce bazowej moduł pletyzmograficzny oraz:

1. Zestawić obwód pomiarowy w następujący sposób:
 - Podłączyć *MODULE OUTPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9,
 - Podłączyć czujnik podczerwieni do złącza *J1* w module pletyzmograficznym.
2. Włączyć zasilanie.
3. Połączyć wejście *HI* multimetru cyfrowego, skonfigurowanego do pomiaru napięcia stałego z emiterem fototranzystora, a wejście *LO* z masą zlokalizowaną w prawym dolnym rogu modułu.
4. Umieścić czujnik podczerwieni w normalnych warunkach oświetleniowych. Następnie przeprowadzić regulację potencjometrem *VR1* w taki sposób, aby napięcie emitera fototranzystora wskazywane przez multimetr wynosiło 1V.
5. Wyłączyć zasilanie oraz rozłączyć układ.

Ad 2. Pomiary charakterystyk poszczególnych elementów toru pomiarowego

I. Charakterystyka filtra górnoprzepustowego

1. Zestawić układ pomiarowy w następujący sposób:

- Gniazdo *OUTPUT* w sekcji generatora funkcyjnego znajdującego się na module bazowym podłączyć do wejścia *CHI* znajdującego się w sekcji *SCOPE ADAPTOR*. Wyjście (*BNC*) *CHI* oraz *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* podłączyć odpowiednio do wejść oscyloskopu cyfrowego.
 - Podłączyć *MODULE OUPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu pletyzmograficznego krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9.
 - Podłączyć wyjście generatora funkcyjnego z wejściem sekcji *HPF*.
 - Gniazdo *GND* generatora funkcyjnego połączyć z masą w dolnym prawym rogu modułu.
 - Połączyć gniazdo *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* z wyjściem z sekcji *HPF*.
2. Umieścić zwory w pozycji 2 i 3 modułu pletzmograficznego.
 3. Włączyć zasilanie.
 4. W ustawieniach generatora funkcyjnego podłączonego do wejścia modułu *HPF* ustawić sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie 1 V, a następnie zaobserwować przebieg na ekranie oscyloskopu.
 5. Nie zmieniając amplitudy sygnału zanotować wartość amplitudy dla częstotliwości sygnału wejściowego: 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 1.1 Hz, 1 Hz, 0.9 Hz, 0.8 Hz, 0.5 Hz oraz 0.1 Hz (dla $f_{\text{cutoff}} = 1$ Hz).
 6. Przenieść zwory z pozycji 2 i 3 na 4 i 5 ($f_{\text{cutoff}} = 0.3$ Hz) i powtórzyć punkt 5.
 7. Na podstawie pomiarów z punktu 5 i 6 sporządzić charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe.
 8. Wyłączyć zasilanie i rozłączyć układ.

II. Charakterystyka wzmacniacza I

1. Zestawić układ pomiarowy w następujący sposób:
 - Gniazdo *OUTPUT* w sekcji generatora funkcyjnego znajdującego się na module bazowym podłączyć do wejścia *CHI* znajdującego się w sekcji *SCOPE ADAPTOR*. Wyjście (*BNC*) *CHI* oraz *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* podłączyć odpowiednio do wejść oscyloskopu cyfrowego.
 - Podłączyć *MODULE OUPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu pletyzmograficznego krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9.
 - Podłączyć wyjście generatora funkcyjnego z wejściem sekcji Gain Amplifier.
 - Gniazdo *GND* generatora funkcyjnego połączyć z masą zlokalizowaną w dolnym prawym rogu modułu.
 - Połączyć gniazdo *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* z wyjściem z sekcji *Gain Amplifier*.
2. Umieścić zworę w pozycji 8 (wzmocnienie = 50).
3. Włączyć zasilanie.
4. W ustawieniach generatora funkcyjnego podłączonego do wejścia modułu *Gain Amplifier* ustawić sygnał sinusoidalny, częstotliwość równą 100 Hz, amplitudę 100 mV oraz zaobserwować przebieg na kanale pierwszym oscyloskopu (*CH1*).
5. Zaobserwować sygnał wyjściowy (*CH2*) z modułu oraz zapisać wartość amplitudy.
6. Przenieść zworę z pozycji 8 do 7 i powtórzyć punkt 4 i 5.
7. Wyłączyć zasilanie i rozłączyć układ.

III. Charakterystyka filtra dolnoprzepustowego 4 rzędu.

1. Zestawić układ pomiarowy w następujący sposób:
 - Gniazdo *OUTPUT* w sekcji generatora funkcyjnego znajdującego się na module bazowym podłączyć do wejścia *CHI* znajdującego się w sekcji *SCOPE ADAPTOR*. Wyjście (BNC) *CHI* oraz *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* podłączyć odpowiednio do wejść oscyloskopu cyfrowego.
 - Podłączyć *MODULE OUPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu pletyzmograficznego krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9.
 - Podłączyć wyjście generatora funkcyjnego z wejściem sekcji *LPF1*.
 - Gniazdo *GND* generatora funkcyjnego połączyć z masą dolnym prawym rogu modułu.
 - Połączyć gniazdo *CH2* w sekcji *SCOPE ADAPTOR* z wyjściem z sekcji *LPF2*.
2. Umieścić zwory w pozycjach 10, 11, 14, 15 i 16.
3. Włączyć zasilanie.
4. W ustawieniach generatora funkcyjnego podłączonego do wejścia modułu LPF ustawić sygnał sinusoidalny o amplitudzie 1 V, częstotliwość równą 1 Hz oraz zaobserwować przebieg na kanale pierwszym oscyloskopu (*CHI*).
5. Na kanale drugim oscyloskopu zaobserwować przebieg wyjściowy oraz zanotować wartość amplitudy.
6. Bez zmiany wartości amplitudy generatora funkcyjnego powtórzyć kroki 4 i 5 dla częstotliwości 1, 5, 10, 30, 35, 40, 45, 50 oraz 100 Hz.
7. Przenieść zwory z pozycji 10, 11, 15, 16, na pozycję 12, 13, 17,18.
8. Powtórzyć punkty 4 –6.
9. Rozłączyć układ i wyłączyć zasilanie.
10. Dla uzyskanych wyników wykreślić charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowe.

IV. Charakterystyka modułu różniczkującego

Postępując analogicznie do poprzednich punktów, zarejestrować sygnał wejściowy i wyjściowy z modułu *Differentiator*. Jako sygnał wejściowy proszę podać sygnał prostokątny o częstotliwości 1 Hz i amplitudzie 1 V.

V. Charakterystyka wzmacniacza II

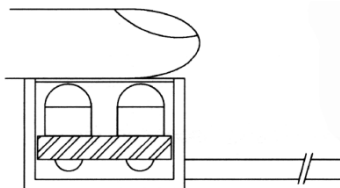
Proszę wyznaczyć wzmocnienie (moduł *Amplifier*) przy krańcowym położeniu (kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara) potencjometru *GAIN1*, przy sinusoidalnym sygnale wejściowym o częstotliwości 100 Hz oraz amplitudzie 100 mV. Następnie regulując potencjometrem *GAIN1* proszę wyznaczyć maksymalne wzmocnienie niewprowadzające zniekształcenia sygnału.

VI. Charakterystyka multiwibratora

Dla wejściowego sygnału prostokątnego o częstotliwości 1 Hz i wartości napięcia międzyszczytowego równego 10 V, zarejestrować sygnał wejściowy i wyjściowy przy „skrajnie prawym” położeniu potencjometru *VR2* w module multiwibratora monostabilnego.

Ad 3. Pomiary objętości naczyń krwionośnych

1. Zestawić układ pomiarowy w następujący sposób:
 - Podłączyć *MODULE OUPUT* w jednostce bazowej do złącza *J2* modułu pletyzmograficznego krótkim przewodem RS232 zakończonym wtyczkami DB9.
 - Umieścić zwory w pozycjach 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 19, 20, 21 i 22.
 - Podłączyć czujnik podczerwieni do wejścia *J1* modułu.
 - Podłączyć wyjście RS232 bazy (*RS-232 OUTPUT*) z portem RS232 komputera.
2. Włączyć zasilanie. W ustawieniach bazy przyciskiem *SELECT* wybrać *MODULE: KL-75006 (PPG)*.
3. Sprawdzić czy czujnik został skalibrowany, oraz czy potencjometr *GAIN1* jest ustawiony w pozycji odpowiadającej maksymalnemu wzmocnieniu nie powodującym zniekształceń sygnału wejściowego.
4. Umieścić palec na czujniku w sposób przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Sposób umieszczenia palca podczas pomiaru [3].

UWAGA: Podczas całego eksperymentu nie powinno się wykonywać żadnych ruchów palcem umieszczonym na czujniku.

5. Dobrać wzmocnienie wzmacniacza (potencjometr *GAIN1*) w taki sposób, aby częstotliwość sygnału na wyjściu *Vo1* była równa częstotliwości sygnału *Vo2*.
6. Uruchomić oprogramowanie KL-720.
7. Ustawić parametry rejestracji, zarejestrować przebiegi.
8. Wykonać proste ćwiczenia na rowerku rehabilitacyjnym.
9. Zarejestrować przebiegi.
10. Porównać zarejestrowane przebiegi przed i po wysiłku.
11. Wyłączyć zasilanie bazy i rozłączyć układ.

UWAGA: Opcjonalnie przebiegi mogą zostać zarejestrowane przy użyciu oscyloskopu.

Ad 4. Pulsoksymetria

Pulsoksymetria jest nieinwazyjną metodą przezskórnego oznaczania wysycenia krwi tlenem. Metoda polega na zasadzie spektrofotometrycznego pomiaru wysycenia (saturacji – SpO₂) tlenem hemoglobiny. Proszę zarejestrować krzywą pletyzmograficzną, wartości SpO₂, następnie wyjaśnić zasadę pomiaru pulsoksymetrem.

Wykaz aparatury

1. Stacja bazowa,
2. Moduł do pomiarów pletyzmograficznych,
3. Komputer PC,
4. Oscyloskop,
5. Elektrody,
6. Przewody oraz zwory, czujnik podczerwieni,
7. Hantle, rowerek rehabilitacyjny,
8. Pulsoksymetr PM60.

Ćwiczenie 5

Chromatografia

Program ćwiczenia

1. Identyfikacja składników mieszaniny alkoholi na podstawie chromatogramu wzorcowego,
2. Wykres kalibracyjny metodą kalibracji bezwzględnej,
3. Metoda normalizacji wewnętrznej.

Zakres wymaganych wiadomości

Budowa i zasada działania chromatografu, podział metod chromatograficznych, metody ilościowe i jakościowe analizy chromatogramu, metoda kalibracji bezwzględnej, metoda normalizacji wewnętrznej.

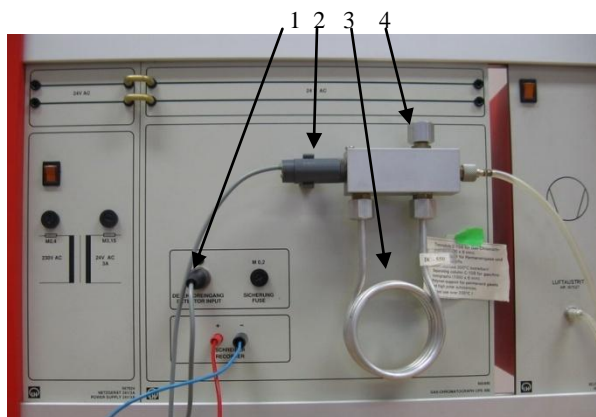
Literatura

- [1] J. Gajda. *Biopomiary*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] Z. Witkiewicz, J. Hetper. *Chromatografia gazowa*. Wyd. II, WNT, 2009.
- [3] Z. Witkiewicz. *Podstawy chromatografii*. Wyd. I, WNT, 1992.
- [4] W. Szczepaniak. *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Wydawnictwa Naukowe PWN, 2007.
- [5] J. Kryściak. *Chemiczna analiza instrumentalna*. Wyd. II, PZWL, Warszawa, 1999.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Identyfikacja składników mieszaniny alkoholi na podstawie chromatogramu wzorcowego

Stanowisko pomiarowe do chromatografii gazowej wyposażone jest w chromatograf (rys. 1), komputer wraz z kartą pomiarową lub opcjonalnie multimetr z możliwością komunikacji z komputerem. Instrukcja obsługi oprogramowania do akwizycji sygnałów z chromatografu znajduje się na stanowisku pomiarowym.



Rys. 1. Aparatura do chromatografii gazowej. 1 – detektor, 2 – czujnik, 3 – kolumna, 4 – wejście do kolumny.

Po przygotowaniu oprogramowania należy rozpocząć pomiar napięcia z detektora. W związku z tym, druga osoba powinna jednocześnie z rozpoczęciem rejestracji wprowadzić do kolumny chromatografu ok. 1 μ l - 3 μ l substancji badanej wskazanej przez prowadzącego. Do wprowadzania substancji badanych służy strzykawka laboratoryjna (rys. 2).



Rys. 2. Strzykawka laboratoryjna do wprowadzania badanej substancji.

UWAGA: Ze względu na bardzo mały przekrój wewnętrzny igły, należy zachować szczególną ostrożność podczas wprowadzania igły do wejścia kolumny (igła łatwo może ulec zgięciu lub złamaniu).

Otrzymany chromatogram należy zapisać i następnie powtórzyć procedurę dla drugiej substancji dostarczonej przez prowadzącego ćwiczenia. Na podstawie chromatogramu wzorcowego (rys. 3) proszę zidentyfikować składniki substancji badanej.

Ad 2. Wykres kalibracyjny metodą kalibracji bezwzględnej

Metodę kalibracji bezwzględnej stosuje się zwykle w celu oznaczenia jednego lub kilku składników próbki. W celu wykreślenia wykresu kalibracyjnego (dopasowanie prostej proszę wykonać korzystając z metody najmniejszych kwadratów) do kolumny dozjuje się ściśle odmierzone, wzrastające objętości substancji wzorcowej (np. 1 μ l, 3 μ l, 5 μ l, 7 μ l) dostarczonej przez prowadzącego, która jest substancją analizowaną. Każde dozowanie należy powtórzyć 3-krotnie i wyznaczyć wartość średnią wysokości h i powierzchni A pików.

Następnie należy sporządzić krzywą kalibracyjną przedstawiającą zależność A oraz h od objętości.

Na podstawie otrzymanych krzywych wzorcowych proszę wyznaczyć objętość substancji, dla której krzywa została wyznaczona, w mieszaninach badanych w punkcie 1.

Ad 3. Metoda normalizacji wewnętrznej

Wyznaczenia udziału procentowego wszystkich składników w próbce można dokonać przy wykorzystaniu metody normalizacji wewnętrznej. Metoda normalizacji wewnętrznej polega na pomiarze powierzchni poszczególnych pików po wykonaniu chromatogramu. Wynika z tego, iż warunkiem podstawowym jest, aby w chromatogramie znajdowały się wszystkie piki, wszystkich substancji obecnych w badanej próbce.

W tym celu należy zarejestrować chromatogram. Następnie zmierzyć powierzchnię poszczególnych pików (pole pod wykresem, można użyć ogólnie znanych metod całkowania numerycznego np. metodę prostokątów, trapezów itd.)

Suma wszystkich powierzchni stanowi 100%, a powierzchnia każdego pików w stosunku do powierzchni sumy wszystkich pików odpowiada zawartości procentowej substancji w próbce:

$$C_i = \frac{A_i}{A} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie A_i jest powierzchnią i -tego pików, A jest sumą powierzchni wszystkich pików.

Oczywiste jest, iż taki tok rozumowania jest poprawny przy założeniu że wskazania detektora dla wszystkich składników byłyby równe (patrz: rys. 3). Wiemy, iż różne detektory reagują różnym sygnałem na obecność określonych substancji. W konsekwencji wzajemne stosunki powierzchni poszczególnych pików nie będą odpowiadać wzajemnym stosunkom ilościowym związków znajdujących się w próbce. Należy zatem wprowadzić poprawki (współczynniki korekcyjne), które pozwolą na wzajemne porównanie powierzchni analizowanych substancji.

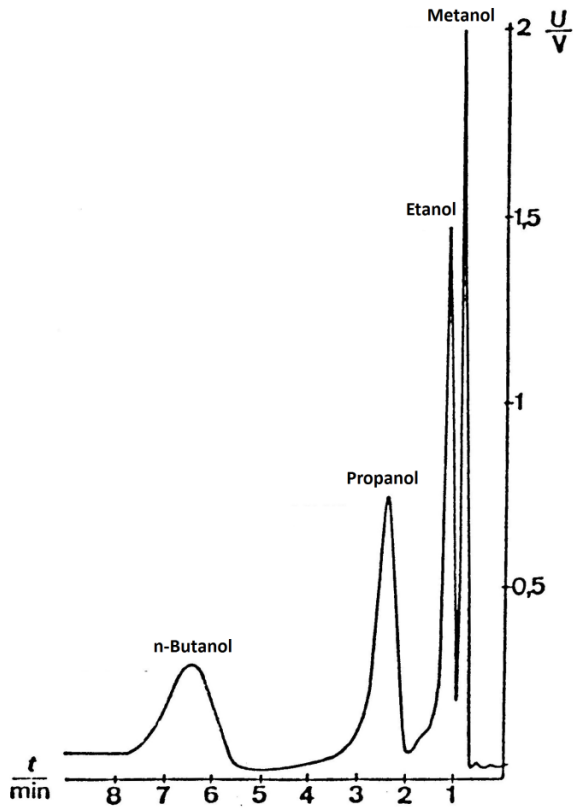
Współczynnikiem korekcyjnym i -tej substancji jest liczba, przez którą należy pomnożyć powierzchnię pików, aby otrzymać wartość wprost proporcjonalną do masy substancji i -tego składnika. Jako substancję porównawczą należy przyjąć główny składnik danej próbki (współczynnik korekcyjny przyjmujemy równy 1). W celu wyznaczenia współczynników korekcyjnych k_i dla pozostałych substancji należy przygotować wzorcową mieszaninę złożoną z równych ilości masowych wszystkich składników analizowanej próbki. Współczynniki k_i wyznaczamy według zależności poniżej:

$$k_i = \frac{A_{wz}}{A_i} \quad (2)$$

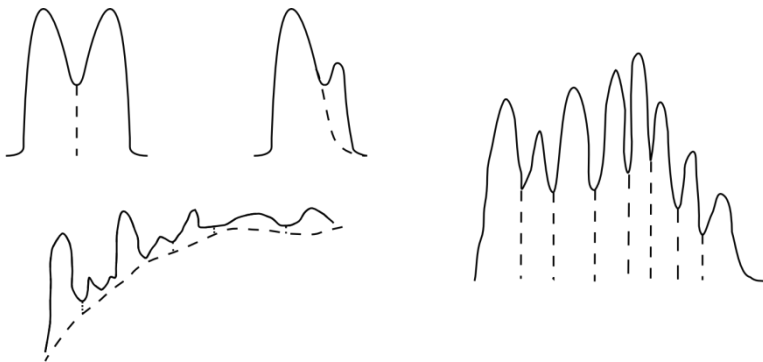
gdzie: A_{wz} – powierzchnia pików wzorca, A_i – powierzchnia pików i -tej substancji.

Prezentowana procedura daje poprawne wyniki, gdy na chromatogramie pików odpowiadające poszczególnym substancjom są odizolowane względem siebie. W sytuacji, gdy dwa lub więcej pików nakładają się na siebie, konieczne jest dokonanie rozdzielania pików w celu wyznaczenia powierzchni poszczególnych składników. Przykłady

prawidłowego wyznaczania powierzchni przy niecałkowitym rozdzielaniu mieszaniny przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Chromatogram wzorcowy.



Rys. 4. Różne sposoby obliczania powierzchni pików w przypadku niecałkowitego rozdzielania składników mieszaniny i dryfu linii podstawowej; na podstawie [2].

Wykaz aparatury

1. Chromatograf,
2. Komputer PC z monitorem,
3. Karta pomiarowa,
4. Multimetr z portem RS232,
5. Zestaw próbek badanych,
6. Szkło laboratoryjne,
7. Strzykawka laboratoryjna.

Ćwiczenie 6

Spektrofotometria UV – Vis

Program ćwiczenia

1. Wyznaczanie stężeń procentowych roztworów,
2. Kontrola czystości związków chemicznych,
3. Oznaczanie stężenia pojedynczego składnika,
4. Obserwacja wpływu wyboru analitycznej długości fali na postać krzywych kalibracyjnych,
5. Obserwacja widm wybranych związków chemicznych.

Zakres wymaganych wiadomości

Budowa i zasada działania spektrofotometru, prawa absorpcji, odchylenia od praw absorpcji, metody analizy ilościowej i jakościowej w spektrofotometrii UV – Vis, definicja absorbancji i transmitancji.

Literatura

- [1] W. Szczepaniak. *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
- [2] T. Nowicka-Jankowska. *Spektrofotometria UV/VIS w analizie chemicznej*. PWN, 1998.
- [3] (p. red.) J. Bryłka. *Eksperymentalna chemia fizyczna*. Wydawnictwo SGGW, 1995.
- [4] J. Gajda. *Biopomiary*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczeń należy założyć odzież ochronną, rękawiczki oraz zapoznać się z stanowiskowymi przepisami BHP oraz kartami charakterystyk substancji wykorzystywanych podczas ćwiczeń. Przed przystąpieniem do

pomiarów spektrofotometr powinien być włączony przynajmniej 30 min. Instrukcja obsługi spektrofotometru oraz oprogramowania znajduje się na stanowisku pomiarowym.

Ad 1. Wyznaczanie stężeń procentowych roztworów

Pierwszym zadaniem podczas ćwiczenia jest wyznaczenie stężeń procentowych roztworów oznaczonych numerami od 1 do 6, dostarczonych przez prowadzącego. Na stanowisku pomiarowym znajduje się dokumentacja zawierająca informację na temat jak dany roztwór został przygotowany, co umożliwi wyznaczenie tychże stężeń.

Podczas wyznaczania przydatne będą następujące zależności:

$$n = \frac{m_s}{M}, \quad \rho = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

$$c_{mol} = \frac{n}{V} = \frac{m_s}{M \cdot V} \quad (2)$$

$$c_p = \frac{m_s}{m_r} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie, c_{mol} – stężenie molowe, c_p – stężenie procentowe, V – objętość roztworu, M – masa molowa [g/mol], m_s – masa substancji, m_r – masa roztworu, ρ – gęstość.

Ad 2. Kontrola czystości związków chemicznych

Jednym z zastosowań spektrofotometrii UV - Vis jest kontrola czystości związków. Przykładowo można sprawdzić, czy alkohole są zanieczyszczone związkami aromatycznymi.

Wykonanie ćwiczenia:

UWAGA: Wszystkie procedury napełniania kuwet pomiarowych należy wykonywać pod nadzorem prowadzącego.

UWAGA: Pomiary w zakresie UV wykonywane są przy wykorzystaniu kuwet wykonanych z kwarcu, w zakresie widzialnym stosuje się kuwety ze szkła optycznego.

1. Uruchamiamy oprogramowanie UVSoftware:
 - nawiązujemy połączenie ze spektrofotometrem (przycisk *Connect*)
 - inicjalizujemy (przycisk *Initialization*), po przejściu wszystkich testów naciskamy OK.
2. Używając pipety, pierwszą z kuwet (kuwetę zawsze trzymamy za matowe ścianki) napełniamy substancją odniesienia, oznaczoną jako REF.
3. Drugą kuwetę napełniamy roztworem oznaczonym jako I.
4. Kuwety umieszczamy w komorze pomiarowej (rys 1).
5. Skanowanie widma
 - wybieramy ikonę odpowiadającą za skanowanie widma,



Rys. 1. Spektrofotometr UV-Vis wykorzystywany podczas zajęć.

- w ustawieniach parametrów wybieramy zakres pomiarowy, wielkość mierzoną oraz tryb sprawdzania próbki odniesienia,
 - rozpoczynamy pomiar przyciskiem start, następnie wykonujemy polecenia pojawiające się na ekranie.
6. Po wykonaniu pomiaru zapisujemy wyniki.
 7. Procedurę powtarzamy dla substancji od II-IV.
 8. W sprawozdaniu należy umieścić otrzymane widma wraz z przeprowadzoną analizą czystości na podstawie widm.

Ad 3. Oznaczanie stężenia pojedynczego składnika

Ilościowe oznaczenia metodą spektrofotometrii UV-Vis należą do metod porównawczych. W ramach ćwiczenia zostanie zademonstrowana metoda porównywania z pojedynczym wzorcem oraz metoda krzywej wzorcowej.

Metoda porównywania z pojedynczym wzorcem polega na pomiarze absorbancji roztworu badanego oraz wzorcowego o znanym stężeniu przy tej samej długości fali λ i w kuwetach o tej samej grubości b .

W ramach zajęć proszę zarejestrować widma roztworów 1-6, dla których wyznaczono stężenia procentowe w punkcie 1 oraz roztworu o nieznanym stężeniu oznaczonym numerem 7. Jako roztwór odniesienia proszę zastosować wodę destylowaną.

Wykorzystując jeden z roztworów o znanym stężeniu (1-6) należy wyznaczyć poszukiwane stężenie roztworu 7 w następujący sposób:

Zmierzone absorbancje roztworu badanego A_x i wzorcowego A_s mogą być wyrażone następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} A_x &= \varepsilon_\lambda \cdot c_x \cdot b \\ A_s &= \varepsilon_\lambda \cdot c_s \cdot b \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie ε_λ jest molowym współczynnikiem absorpcji przy długości fali λ , b – grubością kuwety pomiarowej, a c_x, c_s – stężeniami roztworu badanego i wzorcowego. Dzieliąc równania stronami możemy wyznaczyć poszukiwane stężenie z zależności:

$$c_x = \frac{A_x}{A_s} c_s. \quad (5)$$

Otrzymane wyniki należy porównać z krzywymi wzorcowymi. Aby otrzymać krzywą wzorcową należy dla analitycznej długości fali odczytać wartości absorbancji z widm zarejestrowanych dla roztworów o znanym stężeniu, a następnie metodą najmniejszych kwadratów dopasować prostą do punktów $(c_i, A_{\lambda,i})$. $c_i, A_{\lambda,i}$ są odpowiednio stężeniem i absorbancją dla analitycznej długości fali i – tego roztworu.

Ad 4. Obserwacja wpływu wyboru analitycznej długości fali na postać krzywych kalibracyjnych

Dla zarejestrowanych widm KMnO_4 , proszę na jednym wykresie umieścić krzywe kalibracyjne wyznaczone dla długości fal odpowiadających maksimum lokalnym zlokalizowanym w zakresie długości fali λ , 450 – 600 nm oraz jednej wartości przy *plateau* krzywej.

W sprawozdaniu, na podstawie otrzymanego wykresu, należy przeanalizować wpływ wyboru analitycznej długości fali na czułość oznaczeń.

Ad 5. Obserwacja widm wybranych związków chemicznych

Należy zarejestrować charakterystyki transmitancji w funkcji długości fali substancji dostarczonych przez prowadzącego. Na podstawie zarejestrowanej charakterystyki proszę przeanalizować kolor badanego roztworu.

Wykaz aparatury

1. Spektrofotometr Rayleigh UV1800,
2. Komputer PC z monitorem,
3. Kuwety pomiarowe,
4. Szkło laboratoryjne,
5. Zestaw roztworów badanych.

Ćwiczenie 7

Pomiary termograficzne¹

Program ćwiczenia

1. Określanie pozornej temperatury odbitej,
2. Wyznaczanie emisyjności badanych obiektów,
3. Pomiar termograficzny różnych obiektów.

Zakres wymaganych wiadomości

Pojęcia: termografia, emisyjność, od czego zależy emisyjność obiektów, zastosowania pomiarów termowizyjnych, zasada działania kamer termowizyjnych, detektory promieniowania podczerwonego, prawo Boltzman'a, ciało doskonale czarne.

Literatura

- [1] Dokumentacja techniczna kamery FLIR A320, www.flir.com.
- [2] Norma DIS ISO 18434-1.
- [3] (p. red.) H. Madura, „*Pomiary termowizyjne w praktyce*”, Agencja Wydawnicza PAKu, 2004.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Określanie pozornej temperatury odbitej

Ze względu na charakter pomiarów termowizyjnych rejestrujących promieniowanie podczerwone, konieczne jest wyznaczenie pozornej temperatury odbitej. Kamera termowizyjna rejestruje promieniowanie emitowane przez obiekt oraz promieniowanie odbite pochodzące z innych elementów znajdujących się przed obiektem. Jako przykład można podać operatora kamery czy elementy oświetleniowe.

¹ Instrukcja częściowo powstała na podstawie materiałów udostępnionych dzięki uprzejmości firmy EC TEST SYSTEMS, www.ects.pl

Pozorna temperatura odbita reprezentuje wszystkie „zakłócające” źródła ciepła, które oddziałują na obiekt oraz odbijające się od niego w kierunku kamery. W praktyce wykorzystuje się dwie metody wyznaczania tejże temperatury. Pierwsza z nich, bezpośrednia jest mało przydatna, ponieważ nie uwzględnia ona wpływu ciepła takiego jak generowane przez ciało operatora. Druga metoda, tak zwana odblaskowa jest częściej wykorzystywana w praktyce i ona będzie omówiona i wykorzystana podczas zajęć.

Procedurę wyznaczenia można przedstawić w następujących punktach:

1. Zamontowanie odbłyśnika (jako odbłyśnik można wykorzystać kawałek pogniecionej i rozprostowanej folii aluminiowej) w polu widzenia kamery termowizyjnej w taki sposób, aby był umieszczony w tej samej płaszczyźnie co obserwowany obiekt (rys. 1).

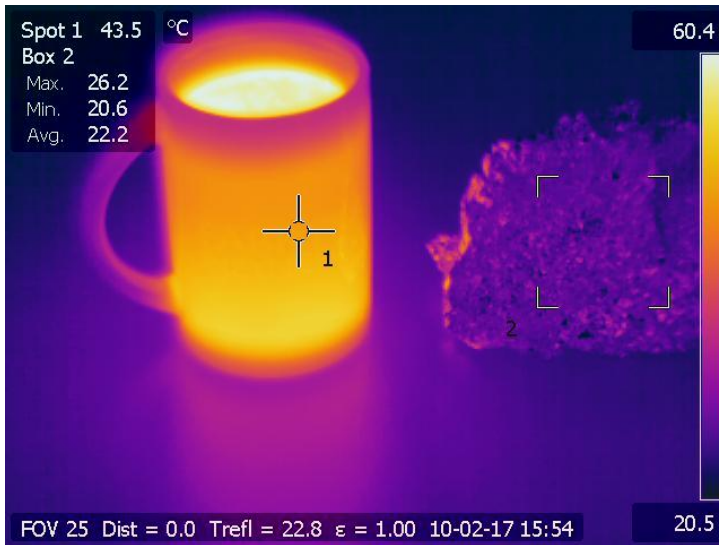


Rys. 1. Przykład obiektu i odbłyśnika.

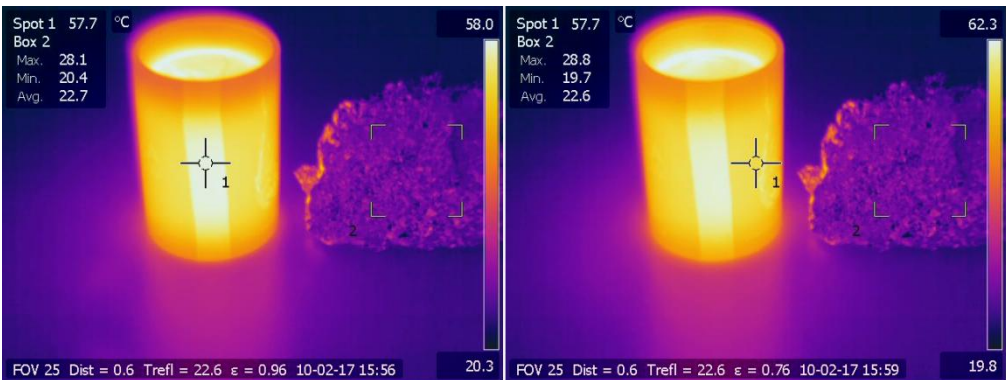
2. Ustawienie emisyjności na 1 oraz odległości na 0 w ustawieniach oprogramowania do obsługi kamery (FLIR IR-Monitor). Przy pomocy narzędzia (*Analysis* -> *Area*) umożliwiającego pomiar temperatury z obszaru, należy zmierzyć średnią temperaturę powierzchni odbłyśnika. Otrzymana temperatura jest pozorną temperaturą odbitą obiektu. Należy ją umieścić w ustawieniach oprogramowania kamery (*Setup* -> *Refl. app. temp.*).

Ad 2. Wyznaczanie emisyjności badanych obiektów

Zgodnie z definicją, emisyjność jest wartością względną w zakresie od 0 do 1 przedstawiającą zdolność powierzchni do emitowania ciepła w danej temperaturze. Jedną z technik wyznaczania emisyjności jest metoda emisyjności odniesienia. W pierwszy krok należy określić pozorną temperaturę odbitą (patrz: punkt 1) i jej wartość wprowadzić do kamery. Następnie fragment badanego obiektu należy pokryć materiałem o znanej



Rys. 2. Pomiar pozornej temperatury odbitej.



Rys. 3. Wyznaczenie nieznannej emisyjności metodą emisyjności odniesienia.

emisyjności. W tym celu można wykorzystać taśmę izolacyjną o znanej emisyjności np. $\epsilon = 0.96$. Dla uzyskania dokładniejszych wyników badana próbka powinna zostać podgrzana do temperatury większej o co najmniej $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ powyżej temperatury otoczenia. W kolejnym kroku wprowadzamy znaną emisyjność do kamery oraz mierzymy temperaturę na wzorcowej powierzchni. Otrzymana temperatura jest naszą temperaturą odniesienia T_{ref} . Ostatecznie w celu wyznaczenia emisyjności badanego obiektu należy wycelować kamerę w obiekt. Ustawiamy emisyjność w kamerze, w taki sposób, aby uzyskać temperaturę taką samą jak poprzednio, równą T_{ref} . W wyniku otrzymujemy emisyjność nieznanego materiału.

Przedstawiona procedura jest skuteczna pod warunkiem zachowania stałej temperatury obiektu podczas wyznaczania emisyjności. Należy również podkreślić, iż uzyskanie takich

samych temperatur dla wzorca i próbki może być bardzo trudne, szczególnie w przypadku, gdy emisyjność obiektu jest bardzo niska np. błyszczący metal.

Ad 3. Pomiary termograficzne różnych obiektów

Po wyznaczeniu nieznanej emisyjności obiektu dostarczonego przez prowadzącego proszę wykonać pomiary:

1. Zarejestrować termogram obrazujący fragment ludzkiego ciała (np. ręki). Emisyjność dla skóry wynosi 0.98.
2. Skierować kamerę na ścianę zawierającą okna, zarejestrować obraz oraz zaobserwować rozkład temperatur wokół nich.
3. Umieścić między kamerą a mierzonym obiektem płytkę szklaną, a następnie wykonaną z pleksi i zarejestrować termogram. W sprawozdaniu należy wyjaśnić zaobserwowany efekt.
4. Przeprowadzić pomiary dla obiektów dostarczonych przez prowadzącego.

Wszystkie zarejestrowane termogramy, wnioski, dokumentację obrazującą procedurę wyznaczania nieznanej emisyjności obiektu proszę umieścić w sprawozdaniu.

Tabele emisyjności oraz instrukcja obsługi oprogramowania znajdują się na stanowisku pomiarowym.

Wykaz aparatury

1. Kamera termowizyjna A320 wraz z instrukcją obsługi,
2. Komputer PC z monitorem,
3. Statywy,
4. Płytki wykonane z różnych materiałów,
5. Obiekty pomiarowe.

Ćwiczenie 8

Pomiary pH, konduktometryczne, lepkości

Program ćwiczenia

1. Kalibracja i pomiary przy użyciu pH-metru,
2. Konduktometria,
3. Pomiary lepkości.

Zakres wymaganych wiadomości

Skala pH, kalibracja pH-metru, zależność SEM ogniwa od pH, zasada działania pH-metru, przewodność, przewodnictwo roztworów elektrolitów, lepkość dynamiczna, lepkość kinetyczna, ciecze niutonowskie oraz nieniuonowskie, czynniki wpływające na lepkość.

Literatura

- [1] J. Gajda. *Biopomiary*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] W. Szczepaniak. *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
- [3] Instrukcje obsługi przyrządów: Lepkościomierz Fungilab SMART, pH-metr CRISON GLP 21+, konduktometr CRISON GLP 31+.
- [4] (p. red.) Z. Gregorowicz. *Wybrane działy analizy instrumentalnej*. Skrypt PŚ, Gliwice, 1994.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczeń należy zapoznać się z instrukcjami przyrządów wykorzystywanych podczas zajęć znajdującymi się na stanowisku pomiarowym.

Ad 1. Kalibracja i pomiary przy użyciu pH-metru

Aby mierzyć poprawnie pH, elektroda oraz urządzenie pomiarowe wymaga kalibracji z użyciem roztworów buforowych. Procedura kalibracji pozwala skompensować zmieniające się w czasie odchylenia asymetrii potencjału i nachylenia charakterystyki elektrody. pH-metr umożliwia przeprowadzenie jedno, dwu i trzy punktowej kalibracji.

Kalibracja jednopunktowa jest dopuszczalna w sytuacji gdy pH substancji mierzonej jest podobne do wartości pH używanego roztworu buforowego. Najczęściej stosuje się kalibrację dwu-punktową. Pozwala ona na pomiary w zakresie kwasowości lub zasadowości. Zalecane jest przeprowadzenie kalibracji buforem o pH równym 7. Następnie, jako drugi używamy bufor o pH równym 4 lub 9 w zależności od zakresu, w którym będziemy mierzyć. W sytuacji, gdy pomiary będą wykonywane w całym zakresie, konieczne jest przeprowadzenie kalibracji trzy-punktowej. Trzy-punktowa kalibracja pozwala skompensować asymetrię potencjału oraz zmiany czułości elektrody w zakresie kwasowym oraz zasadowym.

Ze względu na różnorodność substancji, które zostaną poddane pomiarom należy przeprowadzić kalibrację trzy-punktową. Jednym ze sposobów jest wykreślenie krzywej kalibracyjnej. W tym celu należy:

- w pH-metrze wybrać funkcję pomiaru potencjału,
- badany roztwór buforowy znajdujący się w zlewce umieścić na mieszadle magnetycznym i zanurzyć w nim elektrodę,
- odczytać i zanotować wartość siły elektromotorycznej na pH-metrze, po ustabilizowaniu się jej wartości z dokładnością do ± 1 mV. Zwykle następuje to po kilkudziesięciu sekundach pomiaru. (w tym celu można wykorzystać tryb pomiaru według stabilności),
- pomiary powtórzyć dla dwóch pozostałych roztworów buforowych,
- wykreślić krzywą kalibracyjną,
- parametry krzywej wprowadzić do pH-metru (*Type Calibration -> Data Introduction*).

Następnie należy wykonać pomiary pH dla substancji dostarczonych przez prowadzącego (np. napoje typu „cola”, woda z kranu, woda z mydłem). Wyniki proszę porównać z pomiarami wykonanymi po kalibracji użytkownika (*Type Calibration -> User Buffers*). W tym trybie użytkownik ma możliwość wprowadzenia wartości pH dla 3 buforów, a pH-metr sam wyznacza parametry krzywej kalibracyjnej.

UWAGA: Przed każdym pomiarem należy elektrodę przemyć wodą destylowaną, a następnie osuszyć bibułą.

Ad 2. Konduktometria

Konduktometr GLP 31+ znajdujący się na stanowisku pomiarowym umożliwia pomiary przewodnictwa, zasolenia oraz pomiar TDS (całkowita ilość substancji rozpuszczonych). Analogicznie jak w przypadku pH-metru, konduktometr wymaga przeprowadzenia kalibracji. W procesie tym konieczne jest ustawienie wartości

przewodnictwa odczytanych przez system pomiarowy (urządzenie i celkę) zgodnie z wartościami standardowych roztworów wzorcowych.

Przed przystąpieniem do pomiarów proszę wykonać kalibrację trzy-punktową pamiętając, aby rozpocząć od wzorca o najniższej przewodności, kontynuując w kierunku wyższych wartości. Pozwala to zapobiec problemom związanym z zanieczyszczeniem wzorca o niższej wartości przewodnictwa, roztworami o wartościach wyższych.

Po przeprowadzeniu kalibracji należy wykonać pomiary przewodnictwa oraz zasolenia próbek dostarczonych przez prowadzącego.

Ad 3. Pomiary lepkości

Przed rozpoczęciem pracy z wiskozymetrem należy bardzo dokładnie zapoznać się z informacjami na temat poprawności wykonywania pomiarów umieszczonych w instrukcji stanowiskowej (str. 30 - 34).

UWAGA: Jeżeli po włączeniu lepkościomierza pojawi się napis AUTOTEST, należy się upewnić, iż **nie** jest zainstalowane wrzeciono pomiarowe. Urządzenie **nie** wymaga przeprowadzenia żadnych procedur kalibracyjnych.

UWAGA: Montaż i demontaż wrzeciona pomiarowego jest wykonywany przez prowadzącego ćwiczenia.

W ramach zajęć laboratoryjnych proszę przeprowadzić pomiary lepkości dynamicznej wybranych substancji dostarczonych przez prowadzącego. Bazując na tablicach lepkości oraz dokumentacji technicznej należy zaproponować wrzeciono pomiarowe, które najlepiej będzie się sprawdzać dla danej substancji (nie należy wykonywać pomiarów poniżej 15% zakresu pomiarowego danego wrzeciona oraz w okolicach 100%).

Dla wybranej substancji wskazanej przez prowadzącego należy wyznaczyć charakterystykę lepkości w funkcji temperatury. W tym celu proszę wykorzystać łaźnię wodną znajdującą się na stanowisku pomiarowym.

Wykaz aparatury

1. pH-metr CRISON GLP21+,
2. Konduktometr CRISON GLP31+,
3. Lepkościomierz Fungilab SMART,
4. Komputer PC z monitorem oraz drukarką.

ZINTEGROWANE CZUJNIKI POMIAROWE

opracowali

mgr inż. Krzysztof Kasiński

dr inż. Piotr Maj

Ćwiczenie 1

Podstawy programowania w środowisku LabVIEW

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się z panelem frontowym (ang. *Front Panel*) i diagramem blokowym (ang. *Block Diagram*) środowiska.
2. Pierwszy program.
3. Pętla *While*.
4. Struktura *Case*.
5. Tablice.
6. Wykresy.
7. Pomoc.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowa wiedza o graficznych środowiskach programowania.

Literatura

- [1] P. A. Blume. *The LabVIEW Style Book*. Prentice Hall, 2007.
- [2] R. H. Bishop. *LabVIEW 2009 Student Edition*. Prentice Hall, 2009.
- [3] J. Travis. *LabVIEW for Everyone*. Prentice Hall, 2001.
- [4] J. Conway, S. Watts. *Software Engineering Approach to LabVIEW*. Prentice Hall, 2003.
- [5] D. J. Ritter. *LabVIEW GUI, Essentials Techniques*. McGraw-Hill, 2001.
- [6] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się z panelem frontowym i diagramem blokowym środowiska

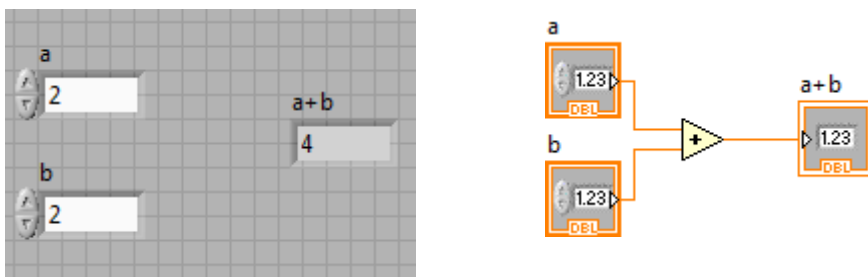
Należy uruchomić środowisko LabVIEW i następnie wybrać opcję New VI. Otwarte zostają dwa okna – *Front Panel* pełniący funkcję interfejsu użytkownika oraz *Block Diagram* zawierający kod programu. Każdemu z okien przypisana jest odpowiednia paleta elementów wywoływana z menu spod prawego klawisza myszy. W przypadku panelu frontowego jest to paleta kontroltek, które programista może dowolnie umieszczać na

interfejsie. Diagram blokowy posiada paletę funkcji, które wraz z niezbędnymi połączeniami będą stanowiły kod programu.

Należy w oknie panelu frontowego położyć kilka różnych elementów (np. pokrętko, wykres, diodę, przycisk) oraz zapoznać się z ich właściwościami. Następnie należy zwrócić uwagę na zawartość palety funkcji. Przeglądając paletę funkcji należy mieć włączone okno pomocy kontekstowej (skrót klawiszowy *Ctrl+H*).

Ad 2. Pierwszy program

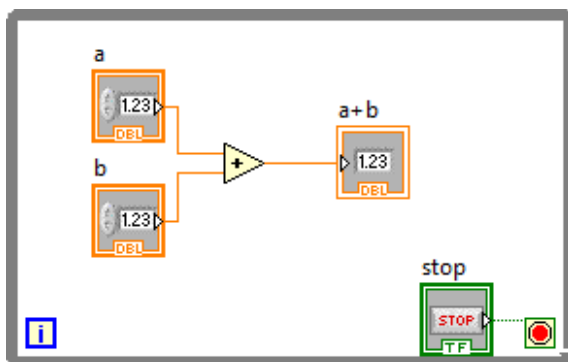
Należy zbudować interfejs użytkownika oraz odpowiadający mu kod programu pokazany na rysunku 1. Należy uruchomić program w oknie panelu frontowego wciskając przycisk *Run*. Należy uruchomić program w oknie diagramu blokowego wciskając przycisk *Highlight Execution*, a następnie przycisk *Run*.



Rys. 1. Interfejs użytkownika i kod programu zapisany w środowisku LabVIEW.

Ad 3. Pętla While

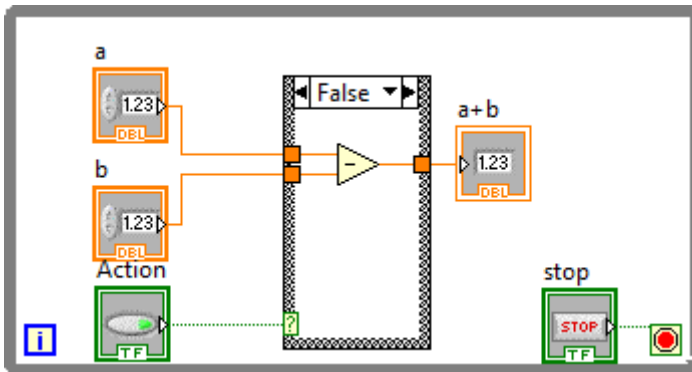
Zbudowany w poprzednim punkcie program należy zmodyfikować, umieszczając go w pętli *While* wybranej z palety funkcji z grupy struktur. Program należy włączyć w trybie normalnym jak i w trybie *Highlight Execution*.



Rys. 2. Kod programu zapisany w środowisku LabVIEW.

Ad 4. Struktura Case

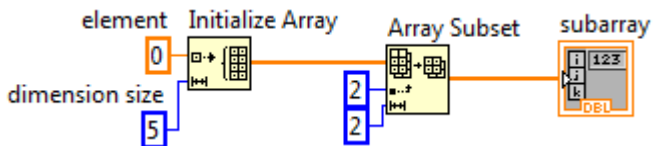
Kolejna modyfikacja dotyczy włączenia w budowany program struktury *Case*. Do terminala warunkowego struktury *Case* należy podłączyć przycisk. Jeżeli przycisk będzie wciśnięty, wykonane zostanie dodawanie elementów, jeżeli wyciśnięty – odejmowanie. Program należy włączyć w trybie normalnym, jak i w trybie *Highlight Execution*.



Rys. 3. Kod programu zapisany w środowisku LabVIEW.

Ad 5. Tablice

W oknie panelu frontowego należy umieścić pustą tablicę, a następnie przeciągnąć do jej wnętrza kontrolkę numeryczną. W ten sposób powstaje jednowymiarowa tablica wartości numerycznych. Do zbudowanej tablicy należy wpisać dowolne wartości, a następnie użyć kilka funkcji z menu *Array* i sprawdzić ich działanie. Należy mieć włączoną opcję pomocy kontekstowej. Przykład inicjalizacji tablicy pięcioma elementami o podwójnej precyzji oraz wykorzystania funkcji wyciągającej z tej tablicy dwa elementy o indeksach 2 i 3 (indeksy liczone są od zera) pokazany jest na rys. 4.



Rys. 4. Kod programu zapisany w środowisku LabVIEW.

Ad 6. Wykresy

Do umieszczania na wykresie pojedynczych punktów służy *Waveform Chart*, natomiast do umieszczania na wykresie całych wektorów danych służy *Waveform Graph*. Należy na interfejsie użytkownika umieścić oba wykresy, a następnie w oknie diagramu

blokowego zapisać fragment kodu, który spowoduje, że na wykresie zostaną pokazane pewne dane (należy mieć otwarte okno pomocy kontekstowej).

Po wyświetleniu danych na wykresie należy zapoznać się z opcjami wykresu.

Ad 7. Pomoc

Oprócz pomocy kontekstowej dostępna jest baza plików z przykładami użycia każdej niemal funkcji środowiska. Należy zapoznać się z opcjami pomocy dostępnymi w menu Help, a w szczególności z aplikacją *Example Finder*.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW.

Ćwiczenie 2

Zastosowanie środowiska LabVIEW do akwizycji danych pomiarowych

Program ćwiczenia

1. Karta pomiarowa w środowisku LabVIEW,
 - a. Konfiguracja karty pomiarowej,
 - b. Akwizycja sygnału analogowego,
 - c. Obsługa cyfrowych wejść/wyjść.
2. Komunikacja szeregową.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowa wiedza o graficznych środowiskach programowania.

Literatura

- [1] R. H. Bishop. *LabVIEW 2009 Student Edition*. Prentice Hall, 2009.
- [2] B. Mihura. *LabVIEW for Data Acquisition*. Prentice Hall, 2001.
- [3] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

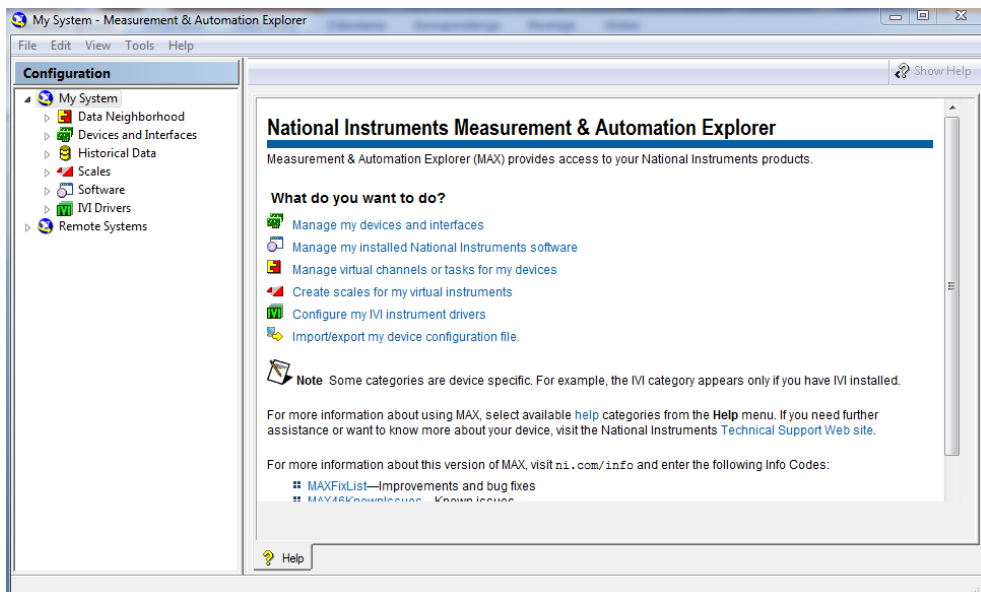
Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Karta pomiarowa w środowisku LabView

a) Konfiguracja karty pomiarowej

Dokonując zakupu dowolnego niemal urządzenia elektronicznego, nie tylko specjalizowanego, dostajemy pakiet odpowiedniego oprogramowania, które umożliwia użytkownikowi skomunikowanie się z urządzeniem przy użyciu komputera PC. Podstawową funkcją otrzymanego oprogramowania jest sprawdzenie funkcjonalności i poprawności działania. Podobnie jest w przypadku kart pomiarowych – razem z kartą dostarczany jest pakiet oprogramowania umożliwiający sprawdzenie podstawowej funkcjonalności, np. akwizycja sygnału analogowego z zadaną częstotliwością próbkowania, czy akwizycja wejść cyfrowych. Takim programem w przypadku kart

pomiarowych firmy National Instruments jest program *Measurement & Automation Explorer* (MAX), którego okno główne pokazane jest na rysunku 1.



Rys. 1. Okno programu Measurement & Automation Explorer.

Aby sprawdzić poprawność instalacji karty pomiarowej i jej podstawową funkcjonalność należy uruchomić program MAX, a następnie w odpowiedniej zakładce wybrać obsługiwaną kartę pomiarową i zapoznać się z możliwymi opcjami obsługi karty w widocznym menu pokazanym na rysunku 2. wraz z opisem podstawowych funkcji.

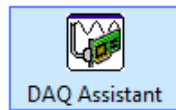
	Self-Test	Self – Test	Sprawdzenie poprawności instalacji
	Test Panels...	Test Panels	Sprawdzenie funkcjonalności
	Reset Device	Reset Device	Reset urządzenia
	Create Task...	Create Task	Tworzenie wątku pomiarowego
	Configure TEDS...		
	Rename		
	Delete		
	Device Pinouts	Device Pinouts	Opis wejść / wyjść karty pomiarowej
	Properties		
	Help		
	Self-Calibrate		

Rys. 2. Menu wywołane spod prawego klawisza myszy umożliwiające wywołanie odpowiednich funkcji obsługi karty pomiarowej.

Należy zwrócić uwagę na opcję *Device Pinouts* pokazującą położenie na złączu karty fizycznych wejść / wyjść – będzie ona niezbędna przy budowaniu systemów pomiarowych.

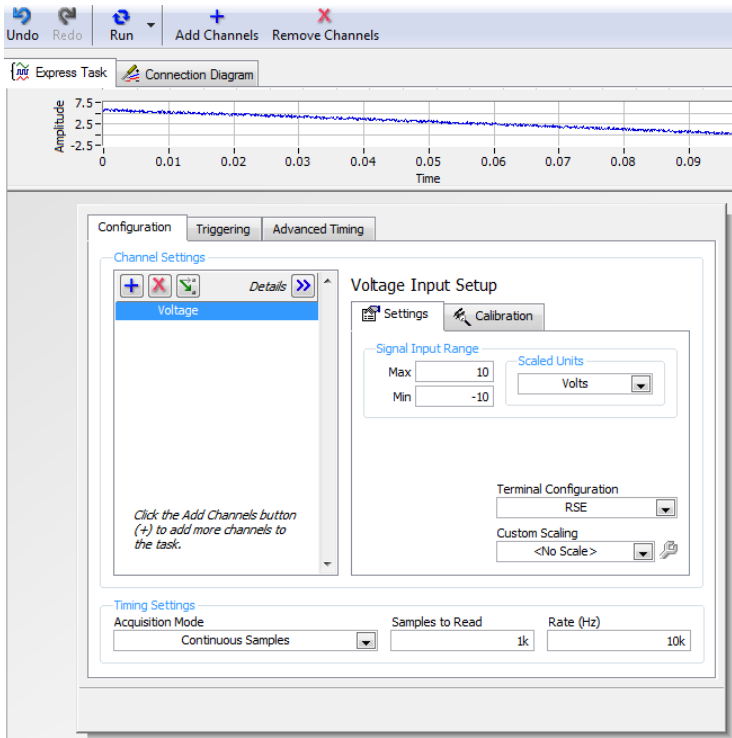
b) Akwizycja sygnału analogowego

Należy uruchomić środowisko LabVIEW, następnie w nowym programie (*Blank VI*) położyć na diagramie blokowym funkcję *DAQ Assistant* (patrz rys. 3).



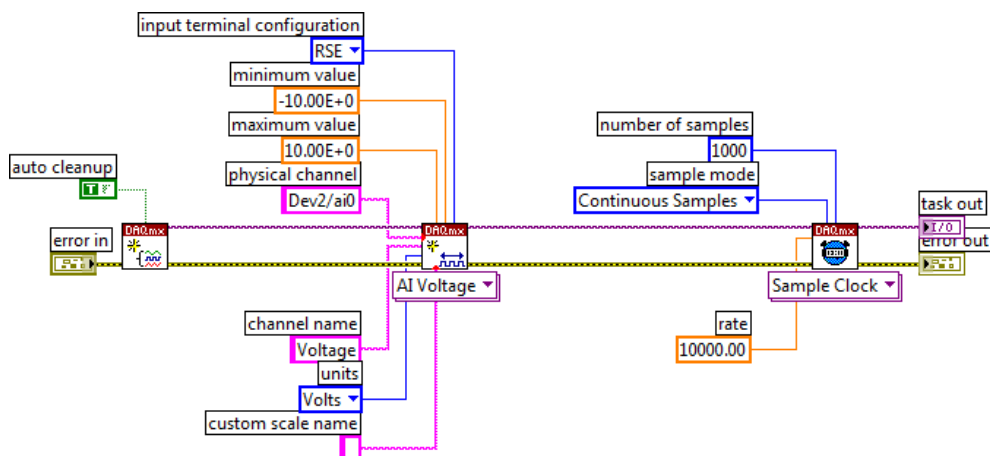
Rys. 3. Funkcja DAQ Assistant.

W otwartym kreatorze zadania pomiarowego (okno kreatora powinno zostać wywołane automatycznie, jeżeli nie zostanie to należy kliknąć dwukrotnie lewym klawiszem myszy na ikonie) należy wygenerować zadanie akwizycji sygnału analogowego (czujnik temperatury lub generator) w trybie ciągłym. Okno konfiguracji takiego zadania pokazane jest na rysunku 4.

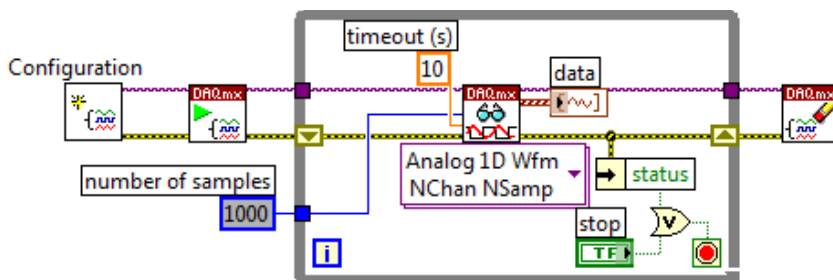


Rys. 4. Opcje konfiguracji zadania w programie *DAQ Assistant*.

Po skonfigurowaniu zadania i sprawdzeniu, że sygnał jest czytany poprawnie, należy przekształcić wygenerowaną funkcję *DAQ Assistant* na zestaw funkcji sterownika *NI-DAQmx* (menu spod prawego klawisza myszy). Należy zapoznać się z użytymi funkcjami i zastanowić się nad kolejnością ich użycia (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Zawartość programu konfigurującego wątek pomiarowy – użyte funkcje powinny być użyte przynajmniej raz przy okazji tworzenia zadania pomiarowego.



Rys. 6. Program umożliwiający pomiar przy użyciu karty pomiarowej w środowisku LabVIEW. Program *Configuration* został pokazany na rysunku 5.

Należy zmienić częstotliwość próbkowania, liczbę zbieranych próbek, zakres pomiarowy i inne, możliwe do zmiany parametry obserwując efekt wprowadzanych zmian.

Na podstawie poprzedniego punktu należy samodzielnie zapisać zadanie pomiarowe (pomiar sygnału z generatora) poprzez odpowiednie użycie funkcji sterownika *NI-DAQmx*. Pomiar realizowany ma być w trybie ciągłym.

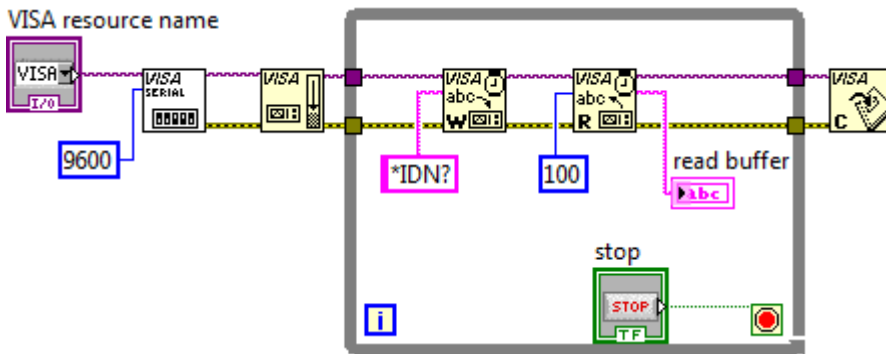
c) Obsługa cyfrowych wejść/wyjść

Należy zbudować wątek obsługi cyfrowych wejść i wyjść w sposób podobny do obsługi analogowego wejścia. Do testów należy użyć generatora i oscyloskopu.

Ad 2. Komunikacja szeregową

Na palecie funkcji w oknie diagramu należy znaleźć funkcję Instrument Assistant (podobną do funkcji DAQ Assistant) i przy jej użyciu skomunikować się z urządzeniem pomiarowym wskazanym przez prowadzącego. Po odpowiednim skonfigurowaniu funkcji ekspresowej, należy dokonać konwersji tej funkcji na kod zawierający podstawowe funkcje środowiska LabVIEW.

Przykład konfiguracji połączenia z urządzeniem pomiarowym pokazany jest na rysunku 7.



Rys. 7. Program umożliwiający komunikację z urządzeniem poprzez port szeregowy RS232.

Należy zbudować program pozwalający na komunikację z urządzeniem pomiarowym przy użyciu funkcji dedykowanych do komunikacji szeregowej. Na diagramie należy umieścić odpowiednie funkcje konfiguracji portu, zapisu i odczytu danych oraz zamknięcia portu. Należy odpowiednio umieścić je w strukturze *WHILE*, a następnie uruchomić i sprawdzić poprawność działania.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. Generator,
3. Oscyloskop.

Ćwiczenie 3

Symulowanie wyjść zintegrowanych czujników pomiarowych

Program ćwiczenia

1. Symulacja urządzenia pomiarowego.
2. Symulacja wyjścia analogowego,
 - a. Tablica danych,
 - b. Dane punkt po punkcie.
3. Symulacja kolejnych ramek komunikacji szeregowej.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowa wiedza o graficznych środowiskach programowania.

Literatura

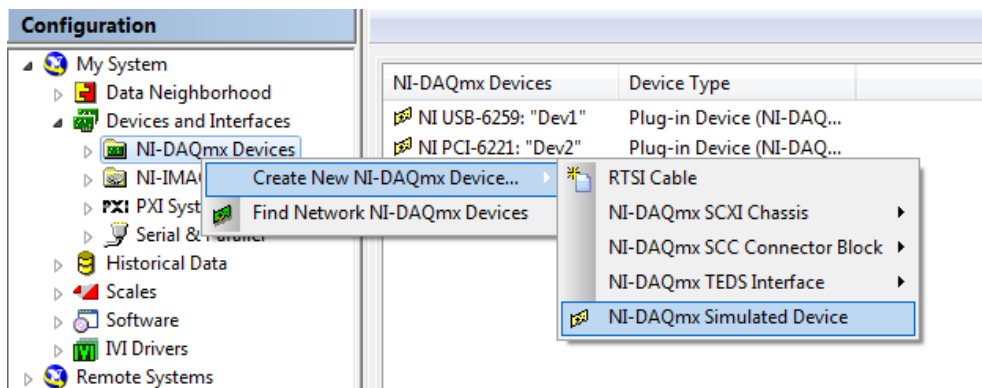
- [1] P. A. Blume. *The LabVIEW Style Book*. Prentice Hall, 2007.
- [2] R. H. Bishop. *LabVIEW 2009 Student Edition*, Prentice Hall, 2009.
- [3] J. Travis. *LabVIEW for Everyone*. Prentice Hall, 2001.
- [4] J. Conway, S. Watts. *Software Engineering Approach to LabVIEW*. Prentice Hall, 2003.
- [5] D. J. Ritter. *LabVIEW GUI, Essentials Techniques*. McGraw-Hill, 2001.
- [6] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Symulacja urządzenia pomiarowego

Podczas pracy nad większym systemem kontrolno-pomiarowym programista bardzo często nie ma możliwości pracować z rzeczywistymi danymi z wielu powodów (np. system pomiarowy jeszcze nie jest gotowy). Dane są najważniejszą częścią każdego oprogramowania, a ich brak uniemożliwia pracę nad programem, więc jeżeli nie są one dostępne w rzeczywistym systemie, należy budować system kontrolno-pomiarowy przy użyciu sygnałów symulowanych.

Oprócz symulowania samych sygnałów często ważne jest również symulowanie urządzenia pomiarowego, które jest odpowiedzialne za zmierzenie odpowiednich sygnałów. Brak urządzenia (np. karty pomiarowej w komputerze) spowoduje błąd wykonania programu natychmiast po jego włączeniu. Aby tego uniknąć i mimo braku urządzenia uruchomić program należy użyć programu *Measurement & Automation Explorer* i tam w menu *Devices and Interfaces* należy wybrać *NI-DAQmx Devices*. W menu, spod prawego klawisza myszy, należy wybrać opcję budowania nowego urządzenia pomiarowego i dalej *NI-DAQmx Simulated Device* (rysunek 1).



Rys. 1. Wybranie trybu symulowania urządzenia pomiarowego.

Wybranie tej opcji spowoduje, że będziemy mogli pracować nad programem pisany w środowisku LabVIEW tak, jakby karta pomiarowa była zainstalowana w komputerze. Dane pomiarowe zwracane przez sterownik symulowanego urządzenia zazwyczaj nie są takie, jakich oczekujemy podczas rzeczywistego pomiaru. Symulowanie urządzenia pozwala na unikanie błędu braku urządzenia w systemie pomiarowym.

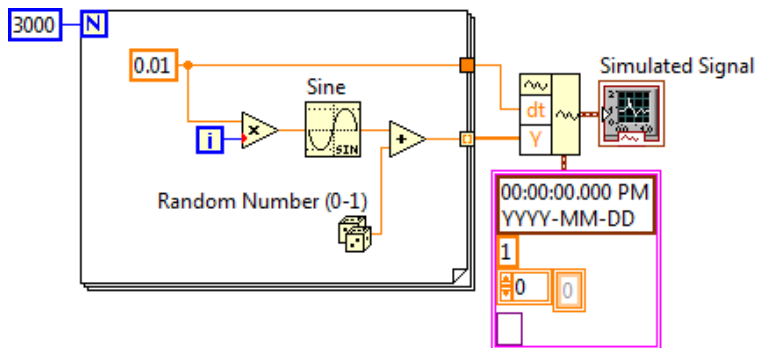
Ad 2. Symulacja wyjścia analogowego

a) Tablica danych

Symulacja wyjść analogowych sprowadza się do generowania liczb rzeczywistych, dających w czasie odpowiedni przebieg i wartości podobne do tych, zmierzonych przy użyciu karty pomiarowej. Pomiar możemy wykonywać w trybie zbierania danych pomiarowych punkt po punkcie lub dokonując akwizycji zadanego ciągu próbek z zadaną częstotliwością próbkowania. W przypadku drugim otrzymujemy jedno lub dwuwymiarową tablicę danych numerycznych. Tablica ta może być elementem struktury typu *Waveform*, w której jest wspomagana przez trzy dodatkowe elementy: czas początku pomiaru, odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi oraz właściwości.

Należy wygenerować strukturę typu *Waveform*, która będzie później wyświetlona na wykresie. Tablica będąca elementem struktury *Waveform* ma reprezentować rzeczywiste dane pomiarowe, a więc posiadające pewien szum. Dane mogą dotyczyć pomiaru

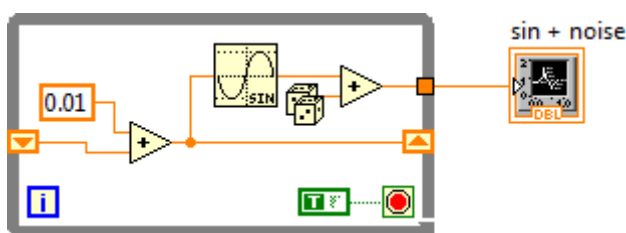
temperatury lub np. odległości wibrującego elementu. W celu generacji tablicy danych można użyć pętli *FOR* z włączoną opcją indeksowania elementów wyjściowych. Przykład pokazany jest na rysunku 2.



Rys. 2. Generowanie sygnału typu *Waveform*.

b) Dane punkt po punkcie

Często używanym trybem pomiaru w aplikacjach kontrolno-pomiarowych jest pomiar punkt po punkcie. Dotyczy to przede wszystkim aplikacji, w których na podstawie odczytanego sygnału należy odpowiednio zareagować. W punkcie 2b. ćwiczenia należy zbudować program generujący dane pomiarowe punkt po punkcie. Tego typu symulator danych powinien pamiętać swój poprzedni stan. Przykład funkcji, której każde kolejne uruchomienie powoduje generowanie kolejnych danych pokazany jest na rysunku 3. Aby zasymulować dodatkowo opóźnienie akwizycji, należy do środka pętli *WHILE* dodać funkcję *WAIT* z odpowiednim parametrem.



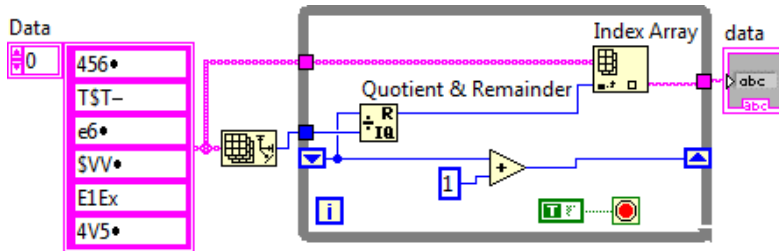
Rys. 3. Funkcja dająca pozwalająca na uzyskanie danych pomiarowych punkt po punkcie – dane są inne przy każdym uruchomieniu programu.

Należy odpowiedzieć na pytanie, dlaczego sygnał nie jest resetowany po włączeniu programu i co należy zrobić, aby sygnał zresetować.

Ad 3. Symulacja kolejnych ramek komunikacji szeregowej

Jeżeli podczas pomiaru aplikacja kontrolno-pomiarowa korzysta z sygnałów mierzonych przez inne niż karta pomiarowa urządzenia (np. multimetr czy oscyloskop),

otrzymywane sygnały to komunikaty w formie ciągu znaków. Symulacja kolejnych komunikatów (danych) przychodzących na wejście portu szeregowego jest w istocie symulacją danych punkt po punkcie. Jednak w tym przypadku dane należy albo wygenerować albo, co jest bardziej wskazane, zapisać wcześniej zmierzone, rzeczywiste dane w tablicy lub pliku i następnie odtwarzać je jedna po drugiej. Aby zapewnić ciągłą pracę generatora należy odpowiednio obsłużyć licznik generowanych danych. Przykład generowania kolejnych ramek przy kolejnym uruchomieniu programu pokazany jest na rysunku 4.



Rys. 4. Funkcja pozwalająca na uzyskanie kolejnych ramek przy kolejnych uruchomieniach programu.

Zadaniem studenta jest sprawdzenie działania programu pokazanego na rysunku 4, a następnie jego zmodyfikowanie tak, aby kolejne ramki danych (kolejne komunikaty) przekazywane były na wyjście programu w sposób asynchroniczny (może być zdefiniowany, ale nie taki sam dla każdej ramki).

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW.

Ćwiczenie 4

Odbiornik GPS

Program ćwiczenia

1. Akwizycja danych z odbiornika GPS.
2. Analiza danych z odbiornika GPS.
3. Wykorzystanie symulatora GPS.
4. Wyświetlenie na mapie punktu o zadanych współrzędnych.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowa wiedza o graficznych środowiskach programowania. Zasada działania systemu GPS.

Literatura

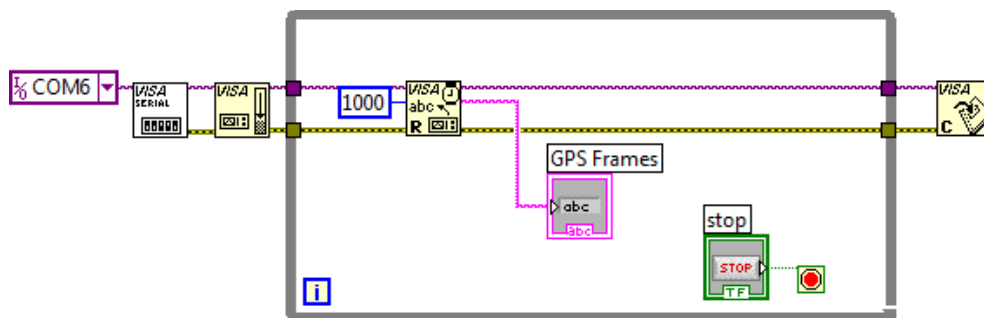
- [1] R. H. Bishop. *LabVIEW 2009 Student Edition*. Prentice Hall, 2009.
- [2] SIRF Protocol Manual.
- [3] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Akwizycja danych z odbiornika GPS

System globalnego pozycjonowania (GPS – *Global Positioning System*) jest dzisiaj powszechnie używany w wielu dziedzinach życia. Odpowiednio rozmieszczone na orbicie okołoziemskiej satelity wysyłają sygnały radiowe o częstotliwości 1575.42 MHz. Na podstawie pomiaru czasu potrzebnego na przebycie drogi od przynajmniej czterech nadajników do odbiornika można obliczyć lokalizację odbiornika w przestrzeni. Dodatkowo przekazywana jest informacja o aktualnym czasie. Odbiornik GPS oprócz analogowego układu zawierającego obwody anteny, zawiera również dedykowany procesor, pozwalający na szybkie zdekodowanie odbieranych informacji i ich przetworzenie. W zależności od odbiornika zaimplementowany w nim algorytm może wyznaczać pewnie dodatkowe informacje opisane w dokumentacji (np. prędkość i kierunek przemieszczania się).

Wyznaczone przez czujnik GPS podstawowe dane o położeniu geograficznym (długość geograficzna, szerokość geograficzna, wysokość nad poziomem morza) oraz aktualny czas wpisywane są w odpowiedni protokół komunikacyjny i wysyłane są do urządzenia nadrzędnego, którym dzisiaj często jest telefon komórkowy, urządzenie mobilne (PDA), nawigacja samochodowa, komputer PC lub nawet specjalistyczna stacja pomiarowa. Odbiornik GPS znajdujący się na stanowisku wysyła dane bezprzewodowo (*Bluetooth*) poprzez emulację portu szeregowego. Z punktu widzenia programisty zachowuje się on tak, jakby był podłączony do portu COM komputera przy pomocy kabla. Należy więc napisać program pozwalający na odbiór danych z odbiornika przy użyciu funkcji biblioteki VISA. Konfiguracja portu powinna być wykonana na podstawie dokumentacji odbiornika dostępnej na komputerze w postaci pliku PDF. Przykład programu pokazany jest na rysunku 1. Program należy zmodyfikować tak, aby w *Indykatorze GPS Frames* widoczne były wszystkie przychodzące komunikaty.



Rys. 1. Odczyt danych z odbiornika GPS podłączonego do portu COM6 komputera.

Ad 2. Analiza danych z odbiornika GPS

Przy użyciu napisanego programu należy zauważyć, że odbierane ramki danych przychodzą asynchronicznie. Dodatkowo - przychodzące ramki danych posiadają różne nagłówki zaczynające się od \$GP. Informacja zawarta w danej ramce zależy od nagłówka, który ją poprzedza. Wszystkie nagłówki opisane są w szczegółach w dostępnej na stanowisku dokumentacji. Dla potrzeb niniejszego ćwiczenia należy posłużyć się informacją zawartą w ramce o nagłówku GGA. Opis ważniejszych elementów informacji znajdujących się za opisanym nagłówkiem pokazany jest w tabeli 1. Aby uzyskać więcej szczegółów należy skorzystać z załączonej dokumentacji do odbiornika lub protokołu SIRF, będącego uniwersalnym protokołem dla większości ogólnodostępnych urządzeń GPS.

Na podstawie załączonych informacji należy napisać funkcję, która pozwoli odpowiednio przetworzyć odbierane z czujnika dane tak, aby otrzymać i pokazać na interfejsie użytkownika informacje o aktualnym czasie (z dokładnością do 1 sekundy) i współrzędnych geograficznych.

Wskazówka: należy skorzystać z faktu, iż dane zawarte w komunikacie zaczynającym się od GGA oddzielone są przecinkami.

Przykład odebranej wiadomości:

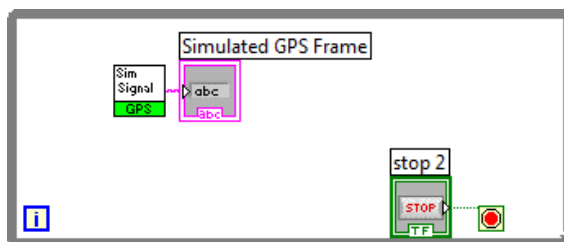
\$GPGGA,161229.487,3723.2475,N,12158.3426,W,1,07,1.0,9.0,M,,,0000*

Tabela 1
Opis wybranych fragmentów protokołu GGA.

Nazwa	Przykład	Opis
Message ID	\$GPGGA	Nagłówek protokołu GGA
UTC Position	161229.487	Aktualny czas hhmmss.sss
Latitude	3723.2475	Szerokość geograficzna w formacie ddmm.mmmm
N/S	N	N = Północ, S = Południe
Longitude	12158.3416	Długość geograficzna w formacie ddmm.mmmm
E/W	W	E = Wschód, W = Zachód
Position Fix Indicator	1	Opis w dokumentacji tabeli 2
Satelites	07	Aktualnie podłączone satelity
HDOP	1.0	Dokładność pomiaru
MSL Altitude	9.0	Wysokość nad poziomem morza

Ad 3. Wykorzystanie symulatora GPS

W celu przygotowania modułu aplikacji pozwalającej zdekodować sygnał odbierany przez odbiornik GPS, sam odbiornik nie jest niezbędny. Można do tego celu użyć symulatora GPS – funkcji pozwalającej uzyskać ramki danych niemal identyczne jak te z rzeczywistego urządzenia. Wspomniany symulator znajduje się w komputerze na stanowisku. Przykład wykorzystania symulatora pokazany jest na rysunku 2. Program zachowuje się niemal identycznie do programu pokazanego na rysunku 1. Główną zaletą tego rozwiązania jest wygoda uruchamiania i testowania funkcji analizy danych.

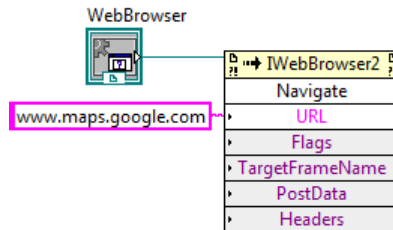


Rys. 2. Odczyt danych z symulatora GPS.

Ad 4. Wyświetlenie na mapie punktu o zadanych współrzędnych

Budując aplikacje kontrolno-pomiarowe często stajemy przed potrzebą zbudowania pewnej funkcjonalności, której implementacja zajmuje bardzo dużo czasu. Należy wówczas

zastanowić się, czy taka funkcjonalność już istnieje, i jeżeli tak, to należy ją wykorzystać. Przykładem może być pokazanie wyznaczonego punktu położenia geograficznego na mapie. W osiągnięciu tego celu należy posłużyć się gotowym serwisem udostępnionym przez firmę Google – Google Maps. Serwis definiuje odpowiednią składnię adresu www, która pozwala na pokazanie w oknie przeglądarki internetowej zdefiniowanego fragmentu mapy. Definicję taką należy znaleźć na stronie serwisu www.maps.google.com. Fragment aplikacji pozwalającej na „wbudowanie” w interfejs pisanego programu okna przeglądarki internetowej pokazany jest na rysunku 3. Należy położyć na interfejsie użytkownika element ActiveX w postaci okna przeglądarki internetowej i wywołać metodę *Navigate*.



Rys. 3. Fragment programu pozwalający na pokazanie okna przeglądarki internetowej w oknie interfejsu użytkownika.

Uwaga: program powinien być napisany tak, aby użycie okna przeglądarki nie spowodowało obsługi czujnika GPS.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. Odbiornik GPS.

Ćwiczenie 5

Czujnik przyspieszenia

Program ćwiczenia

1. Akwizycja danych z czujnika przyspieszenia,
2. Kalibracja i analiza danych z czujnika przyspieszenia.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowa wiedza o graficznych środowiskach programowania. Rodzaje i zasada działania czujników przyspieszenia ze szczególnym uwzględnieniem czujników zintegrowanych.

Literatura

- [1] B. Mihura. *LabVIEW for Data Acquisition*. Prentice Hall, 2001.
- [2] Noty katalogowe czujników przyspieszenia z rodziny ADXL.
- [3] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Akwizycja danych z czujnika przyspieszenia

Wykorzystywany w ćwiczeniu czujnik przyspieszenia, to czujnik z rodziny ADXL. Mierzy on wartość przyspieszenia w dwóch osiach. Zamontowany jest na płycie PCB, a jego wyjścia napięciowe, mówiące o wartości przyspieszenia podłączone są do przetworników analogowo-cyfrowych mikrokontrolera, również znajdującego się na płycie, jak również do odpowiednich pinów znajdujących się na module ADXL202EB-232A. Dodatkowe wyjścia czujnika mówiące o przyspieszeniu przez odpowiednie wypełnienie wysyłanego impulsu prostokątnego (tzw. sygnał PWM – Pulse Width Modulation), również wprowadzone są na odpowiednie piny na zewnątrz modułu.

Informacja o przyspieszeniu może być zatem uzyskana na trzy sposoby:

- Pomiar napięcia,
- Protokół komunikacji z mikrokontrolerem,
- Pomiar szerokości wypełnienia impulsu (pomiar sygnału PWM).

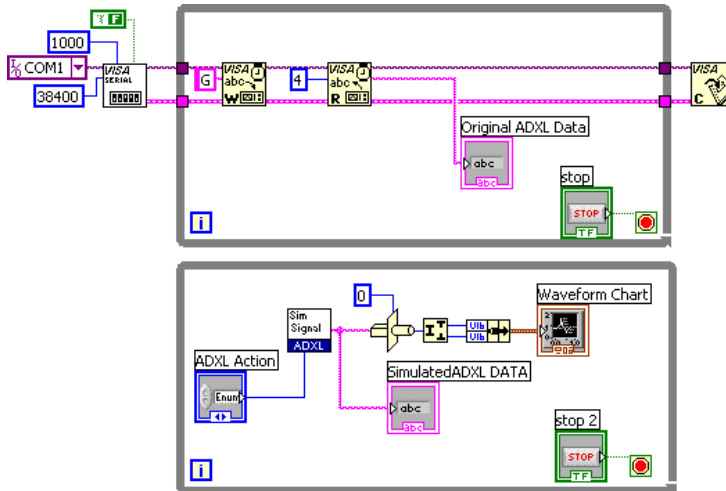
W ćwiczeniu należy skomunikować się z modulem czujnika przy wykorzystaniu opcji drugiej – protokołu komunikacji. Mikrokontroler znajdujący w module czujnika komunikuje się z komputerem PC poprzez port szeregowy wysyłając na żądanie dane o aktualnym przyspieszeniu. Komenda, która powinna być wysłana do układu, jak i parametry konfiguracji portu szeregowego to:

Bound rate: 38400,
Data bits: 8
Start bit: 1
Stop bit: None

Odebrane dane powinny być zdekodowane i wyświetlone na wykresie w postaci danych typu RAW (nie przeskalowanych).

Przykład konfiguracji pokazany jest na rysunku 1. Dodatkowo pokazane jest wykorzystanie znajdującego się na komputerze w postaci funkcji symulatora sygnału z czujnika przyspieszenia. Obie pętle WHILE dają ten sam rezultat na tekstowym indykatorze.

Rysunek 1 pokazuje, że komenda, która powinna zostać wysłana do czujnika to „G” (0x47), natomiast dane odbierane z portu szeregowego to 4 bajty (dwie liczby szesnastobitowe lub jedna trzydziestodwubitowa). Dekodowanie danych polega na odpowiednim rozdzieleniu odbieranych danych.



Rys. 1. Odczyt danych z czujnika i symulatora czujnika przyspieszenia.

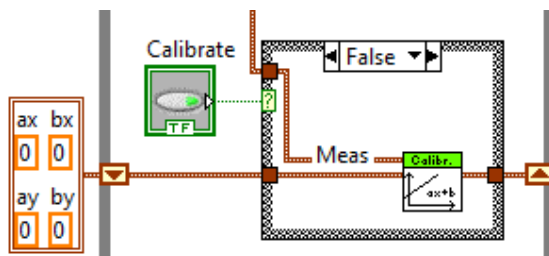
Ad 2. Kalibracja i analiza danych z czujnika przyspieszenia

Należy odpowiednio przetworzyć dane pomiarowe (wartości przyspieszenia) tak, aby na podstawie danych uzyskać wartość i kierunek przyspieszenia (wektor przyspieszenia wyskalowany w m/s^2 należy umieścić na wykresie).

Dodatkowo, należy uzyskać wartość przesunięcia czujnika z punktu A do punktu B. W tym celu należy wykonać kilka niezbędnych kroków:

1. Uśrednianie (filtrowanie) danych wejściowych. Można do tego celu użyć funkcję filtra z palety *Signal Processing >> Point by Point >> Filters* zadając funkcji odpowiednie parametry, lub samodzielnie zbudować funkcję wygładzającą sygnał mierzony (przy użyciu rejestru przesuwne).

2. Kalibracja – zadanie wartości znanych w dwóch punktach (0 oraz przyspieszenie ziemskie) dla dwóch osi i wyznaczenie parametrów równania liniowego (zakładamy liniowe przetwarzanie czujnika). Parametry wyznaczone w procesie kalibracji dla osi x i y (a_x , b_x , a_y , b_y) powinny być pamiętane w rejestrze przesuwne i zmieniane w procesie kalibracji aktywowanym poprzez wciśnięcie odpowiedniego przycisku. Kalibracja powinna być wykonana przy użyciu oddzielnego programu wywoływanego przy użyciu okna dialogowego. Sposób wykonania pokazany jest na rysunku 2.



Rys. 2. Fragment programu realizujący kalibrację przy użyciu okna dialogowego.

3. Analiza odpowiednio przygotowanych danych pomiarowych. W celu wyznaczenia dystansu przesunięcia czujnika z punktu A do punktu B należy dwukrotnie użyć funkcję *Integrate* z palety *Mathematic >> Integration & Differentiation*.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. Czujnik przyspieszenia ADXL.

Ćwiczenie 6

Hallotronowy czujnik prądu

Program ćwiczenia

1. Pomiar wartości prądu stałego.
2. Pomiar wartości skutecznej prądu przemiennego:
 - a. na podstawie przebiegu czasowego prądu,
 - b. na podstawie pomiaru napięcia wyjściowego układu kondycjonującego.
3. Wyznaczanie widma prądu przemiennego za pomocą transformacji FFT.
4. Obserwacja zmian prądu dla różnych rodzajów odbiorników.

Zakres wymaganych wiadomości

Zasada działania czujnika hallotronowego, podstawy cyfrowego przetwarzania sygnałów, analiza czasowo-częstotliwościowa oparta na transformacji Fouriera, filtry cyfrowe, podstawy sensoryki (wstępne przetwarzanie, kalibracja, wzorcowanie).

Literatura

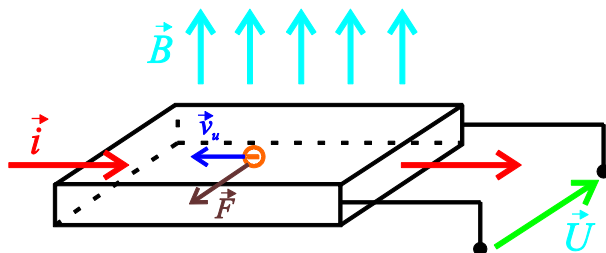
- [1] *Nota katalogowa czujnika ACS712*. Allegro MicroSystems Inc.
- [2] M. Stabrowski. *Miernictwo Elektryczne - Cyfrowa Technika Pomiarowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [3] R. Lyons. *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKiŁ, 2006.
- [4] T. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań*. WKiŁ, 2002.
- [5] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Wprowadzenie

I. Efekt Halla i hallotron

W roku 1879 Edwin Hall zaobserwował zjawisko polegające na powstaniu pod wpływem pola magnetycznego napięcia w przewodniku z płynącym prądem. Napięcie to powstaje poprzecznie do kierunku płynącego prądu i jest proporcjonalne do gęstości prądu

i indukcji magnetycznej. Zjawisko to polega na odchyłaniu strumienia nośników przez pole magnetyczne.



Rys. 1. Zasada działania hallotronu.

Założmy, że w przewodniku płynie prąd. Nośniki ładunku q poruszają się wzdłuż przewodnika z prędkością unoszenia \vec{v}_u . Przewodnik ten umieszczony jest w polu magnetycznym o indukcji \vec{B} prostopadłym do jego powierzchni. W związku z tym, na nośniki prądu działa siła Lorentza \vec{F} (rys. 1).

$$\vec{F} = q\vec{v}_u \times \vec{B} \quad (1)$$

Powoduje ona odchylenie ładunków od ich pierwotnego toru. W związku z tym, na przeciwległych krawędziach przewodnika gromadzą się przeciwne ładunki elektryczne powodując różnicę potencjałów. Warto zwrócić uwagę, że w przewodnikach występują tylko elektrony, ale już w półprzewodnikach przewodnictwo jest zarówno elektronowe, jak i dziurowe. Pomiedzy tymi ściankami powstaje pole elektryczne o natężeniu \vec{E} które oddziałuje również na nośniki ładunku siłą coulombowską. Na nośniki działa zatem siła wypadkowa \vec{F}_w równa:

$$\vec{F}_w = q\vec{v}_u \times \vec{B} - q\vec{E} \quad (2)$$

Dochodzi do równowagi sił Lorentza i Coulomba ($\vec{F}_w = 0$). Potencjał pomiędzy ściankami przewodnika nazwany został potencjałem Halla U_H , którego wartość może być wyrażona:

$$U_H = \frac{IB}{nqc} = \frac{RIB}{c} \quad (3)$$

gdzie: I - natężenie prądu, B - indukcja magnetyczna, n - koncentracja nośników, q - ładunek elementarny, c - grubość płytki, R - współczynnik Halla (stała zależna od materiału).

Hallotron służy do pomiaru indukcji pola magnetycznego, a jego działanie opiera się na efekcie Halla. Hallotrony wykonywane są zazwyczaj z półprzewodników o dużej ruchliwości nośników ładunku (np. InAs - arsenek indu, InSb - antymonek indu, HgTe -

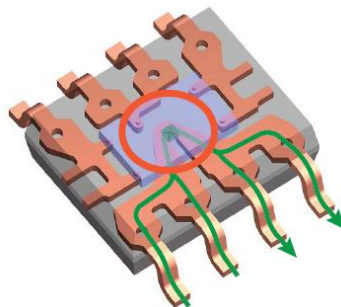
tellurek rtęci). Ponieważ potencjał Halla jest odwrotnie proporcjonalny do grubości próbki łączy się do wykonywania hallotronów bardzo cienkich (ułamek milimetra).

Zatem dla znanych (scharakteryzowanych) materiałów na podstawie pomiaru potencjału Halla można określić wartość indukcji pola magnetycznego. Znajduje to szereg zastosowań. Przykładowo:

- Kompas elektroniczny,
- Pomiar kąta obrotu wraz z prędkością obrotową (magnes zainstalowany na części wirującej współpracujący z nieruchomym hallotroном),
- Pomiar wielkości takich jak: indukcja magnetyczna, natężenie prądu, moc, opór itp.

II. Zintegrowany Hallotronowy czujnik prądu ACS712

Czujnik ACS712 jest zintegrowanym czujnikiem prądu wykorzystującym efekt Halla (rys. 2). Mierzony prąd przepływa wewnątrz czujnika przez ścieżkę miedzianą. Wskutek przepływu prądu generowane jest pole magnetyczne. Różnica potencjałów na pobliskim hallotronie jest zależna od tego pola, a więc również od przepływającego prądu. Napięcie to jest następnie konwertowane na napięcie proporcjonalne do przepływającego prądu.



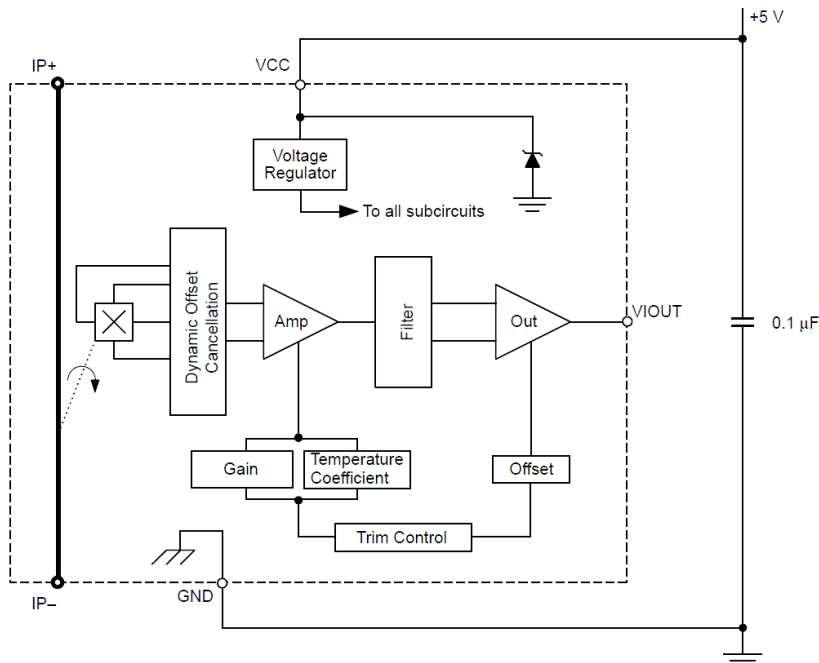
Rys. 2. Zintegrowany hallotronowy czujnik prądu ACS712 [1].

Architektura czujnika jest przedstawiona na rysunku 3. Czujniki te są trzymowane na etapie produkcji, co pozwala zminimalizować rozrzuty między czujnikami. Korekcja ta obejmuje:

- Kompensację temperaturową,
- Korekcję offsetu,
- Korekcję wzmocnienia.

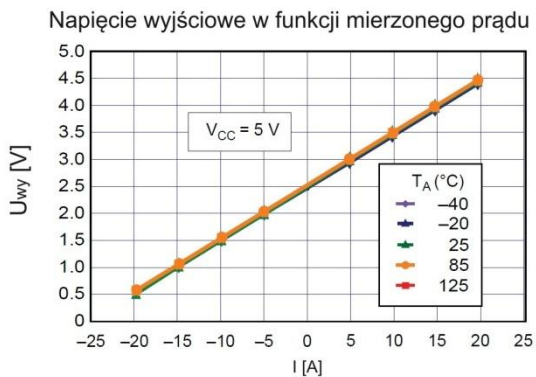
Dzięki temu można traktować czujniki jako identyczne, w związku z czym nie jest konieczna ponowna kalibracja za każdym razem, gdy czujnik jest wymieniany.

Rodzina czujników ACS712 pozwala na pomiar prądów w zakresach od 5 do 50 A chociaż istnieją na rynku podobne rozwiązania pozwalające na pomiar aż do 200 A. Zaletami tych czujników jest brak konieczności stosowania zewnętrznych elementów indukcyjnych (np. przekładnika prądowego), izolacja galwaniczna (min. 2.1 kV), szerokie pasmo (80 kHz), a także niska cena.



Rys. 3. Architektura czujnika ACS712 [1].

Napięcie wyjściowe z czujnika jest proporcjonalne do wartości prądu aktualnie przez niego płynącego (rys. 4). Na jego podstawie można uzyskać m.in. wartość prądu stałego, wartość skuteczną prądu zmiennego, ale i przebieg czasowy prądu zmiennego i jego widmo.



Rys. 4. Charakterystyka napięcia wyjściowego U_{wy} w funkcji mierzonego prądu I , dla różnych temperatur otoczenia (dla czujnika z zakresem 30 A) [1].

III. Pomiary sygnałów zmiennych

Sygnałem okresowo zmiennym nazywa się każdy sygnał, który da się opisać zależnością:

$$y(t) = y(t + mT), m = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

gdzie: $y(t)$ – sygnał zależny od czasu, T – okres sygnału.

Z okresem są związane dwie kolejne wielkości $f=1/T$ – częstotliwość i $\omega=2\pi f$ – pulsacja. Sygnał okresowy można zapisać w formie szeregu Fouriera w następujący sposób:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} Y_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (5)$$

gdzie: $y(t)$ - sygnał zależny od czasu, Y_0 - składowa stała, Y_n - amplituda k -tej harmonicznej, φ_k - faza k -tej harmonicznej.

Szczególnym przypadkiem przebiegu harmonicznego jest sinusoida. Sygnał taki zawiera tylko jedną składową częstotliwościową (sygnał monoharmoniczny). Poniższy wzór przedstawia sygnał sinusoidalny o amplitudzie U i pulsacji ω ze składową stałą U_0 .

$$y(t) = U_0 + U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Należy, zwrócić uwagę, że we współczesnych systemach pomiarowych mamy do czynienia przede wszystkim z sygnałami dyskretnymi. Dla uproszczenia przyjmiemy, że dyskretny jest czas. Sygnał jest zatem określony w postaci ciągu wartości zwanych próbkami (*sample*). Próbkę reprezentują wartości sygnału w kolejnych chwilach czasu. Chwile te mogą przyjmować tylko wartości będące całkowitą wielokrotnością okresu próbkowania T_s , będącące odwrotnością tzw. częstotliwości próbkowania f_s .

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (7)$$

Przykładowo, sygnał sinusoidalny ze składową stałą przedstawiony wcześniej, w wersji cyfrowej będzie wyglądał następująco:

$$y(n) = U_0 + U \cdot \sin\left(\frac{\omega n}{f_s} + \varphi\right), n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Fakt, że analizowany sygnał jest cyfrowy wpływa również na sposób prowadzenia obliczeń. Nie jest możliwe bowiem obliczenie całki z sygnału dyskretnego. Poniżej

zdefiniowano parametry charakteryzujące sygnały okresowe w dziedzinie ciągłej i dyskretnej.

Wartość średnia (mean value) jest zdefiniowana dla sygnałów okresowych poniższymi wzorami:

$$y_{mean} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt, T - \text{okres} \quad (9)$$

$$y_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n), N - \text{liczba próbek w okresie} \quad (10)$$

Tak zdefiniowana wielkość jest tożsama ze składową stałą sygnału. Ponieważ wartość średnia sinusoidy jest równa zero często stosuje się tzw. wartość średnią wyprostowaną (ARV – average rectified value).

$$y_{AVR} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt, T - \text{okres} \quad (11)$$

$$y_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |y(n)|, N - \text{liczba próbek w okresie} \quad (12)$$

Wartość szczytowa (peak value) jest to maksymalna wartość sygnału.

$$y_{max} = \max(y(t)) \quad (13)$$

Wielkość ta jest często stosowana do scharakteryzowania sygnału, który jest bipolarny lecz nie jest sinusoidalny. Wartość szczytowa sygnału sinusoidalnego jest równa jego amplitudzie.

$$y_{max} = \max(U \cdot \sin(\omega t + \varphi)) \quad (14)$$

$$y_{max} = \max(U \cdot \sin(\frac{\omega n}{f_s} + \varphi)) \quad (15)$$

Wartość międzyszczytowa (peak-peak value) jest różnicą pomiędzy wartością maksymalną, a minimalną sygnału.

$$y_{p-p} = \max(y(t)) - \min(y(t)) \quad (16)$$

$$y_{p-p} = \max(y(n)) - \min(y(n)) \quad (17)$$

Wartość międzyszczytowa sygnału sinusoidalnego jest równa podwojonej amplitudzie.

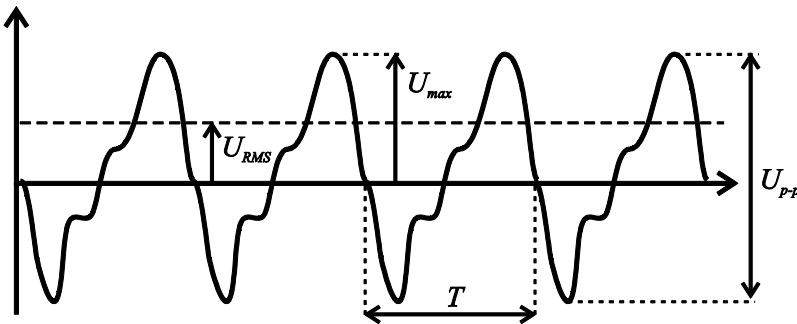
Wartość skuteczna sygnału (*RMS – Root Mean Square*). Z definicji, wartość skuteczna prądu przemiennego jest taką wartością prądu stałego, która w ciągu czasu równego okresowi prądu przemiennego spowoduje ten sam efekt cieplny, co dany sygnał zmienny na takim samym rezystorze. Wartość skuteczną można jednak obliczyć dla każdego sygnału (nie tylko prądu). Wzór na wartość skuteczną sygnału okresowego wygląda następująco:

$$y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt}, \quad (18)$$

$$y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)}, \quad (19)$$

gdzie: y_{RMS} - wartość skuteczna, T - okres sygnału ciągłego $y(t)$ lub jego całkowita wielokrotność, N - liczba próbek w okresie lub jego całkowitej wielokrotności.

Dla sygnału sinusoidalnego $y(t) = U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ wartość skuteczna jest równa $y_{RMS} = \frac{U}{\sqrt{2}}$.



Rys. 5. Ilustracja wybranych wielkości charakteryzujących sygnał.

Widmo Fouriera

Analiza Fouriera jako jedno z najważniejszych narzędzi cyfrowego przetwarzania sygnałów (*DSP – Digital Signal Processing*) pozwala na scharakteryzowanie sygnału pod kątem zawartości składowych o różnych częstotliwościach. Poniższe wyrażenie jest wzorem na dyskretną transformację Fouriera (*DFT*) i służy do przekształcenia sygnału cyfrowego w dziedzinie czasu na sygnał zespolony (amplituda i faza) w dziedzinie częstotliwości.

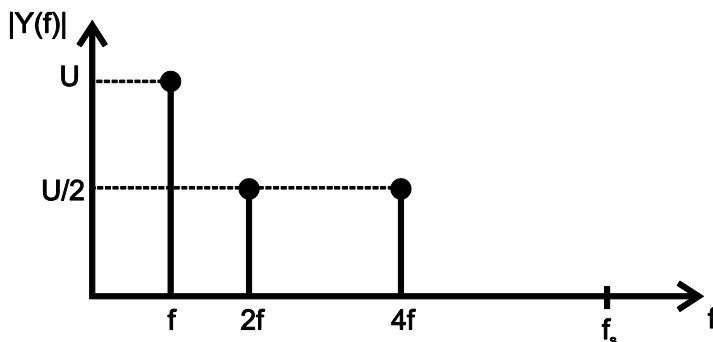
$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (20)$$

gdzie: $Y(k)$ – zespolone współczynniki dyskretnego przekształcenia Fouriera, $y(n)$ – badany sygnał dyskretny, N – liczba próbek analizowanego sygnału. Współczynniki $Y(k)$ są wartościami zespolonymi reprezentującymi część rzeczywistą i urojoną przekształcenia. Aby wyznaczyć widmo amplitudowo - częstotliwościowe analizowanego sygnału, należy obliczyć moduł tych współczynników $|Y(k)|$.

Widmo częstotliwościowe sygnału zawierającego kilka sinusoid o różnych częstotliwościach jest reprezentowane przez pojedyncze prążki dla częstotliwości odpowiadających poszczególnym składowym sygnału. Przeanalizujmy sygnał zawierający trzy sinusoidy o różnych częstotliwościach i różnych amplitudach:

$$y(n) = U \cdot \sin(2\pi n \frac{f}{f_s}) + \frac{U}{2} \cdot \sin(2\pi n \frac{2 \cdot f}{f_s}) + \frac{U}{2} \cdot \sin(2\pi n \frac{4 \cdot f}{f_s}) \quad (21)$$

Widmo częstotliwościowe takiego sygnału będzie wyglądało jak na rysunku 6.



Rys. 6. Widmo przykładowego sygnału poliharmonicznego.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Pomiar wartości prądu stałego

Należy odłączyć terminal karty pomiarowej od komputera (na podstawie dołączonej dokumentacji). Następnie podłączyć czujnik do odpowiednich złączy. Przed ponownym podłączeniem terminala do komputera należy wezwać prowadzącego celem weryfikacji poprawności połączeń.

Przygotować program umożliwiający ciągły pomiar napięcia wprost z wyjścia czujnika oraz za obwodem kształtującym. Na podstawie dokumentacji czujnika i pomiarów

z wykorzystaniem miernika wzorcowego należy odpowiednio przeskalować zmierzone wartości napięcia aby uzyskać wartości wyrażone w Amperach. Na tym etapie program powinien działać podobnie jak oscyloskop.

Ad 2. Pomiar wartości skutecznej prądu zmiennego

Należy dodać do oprogramowania funkcjonalność obliczającą wartość skuteczną prądu przemiennego w kilku wariantach opierając się na:

- amplitudzie prądu i założeniu, że jest to przebieg sinusoidalny,
- definicji wartości skutecznej (*RMS*),
- wyjściu prostownika jednopółokowego.

Ad 3. Wyznaczenie widma prądu zmiennego

Należy dodać do oprogramowania funkcjonalność obliczającą i wyświetlającą widmo częstotliwościowe prądu.

Ad 4. Obserwacja zmian prądu dla różnych rodzajów odbiorników.

Korzystając z przygotowanego oprogramowania należy zaobserwować przebiegi czasowe obliczonych wartości i widma prądu pobieranego przez różne odbiorniki.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową National Instruments i środowiskiem LabView,
2. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru prądu stałego,
3. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru prądu zmiennego.

Ćwiczenie 7

Zintegrowany czujnik wilgotności i temperatury

Program ćwiczenia

1. Nawiązanie komunikacji z czujnikiem.
2. Pomiar temperatury i wilgotności względnej.
3. Wyznaczenie innych wielkości związanych z wilgotnością.
4. Obserwacja zmian sygnałów w warunkach zmiennej wilgotności i temperatury.

Zakres wymaganych wiadomości

Rodzaje i zasada działania zintegrowanych czujników wilgotności i temperatury, znajomość wielkości podstawowych i pochodnych związanych z wilgotnością i temperaturą, podstawy cyfrowego przetwarzania sygnałów, filtry cyfrowe, podstawy sensoryki (wstępne przetwarzanie, kalibracja, wzorcowanie), szeregowo interfejsy komunikacyjne (w szczególności wykorzystujące linie dwukierunkowe).

Literatura

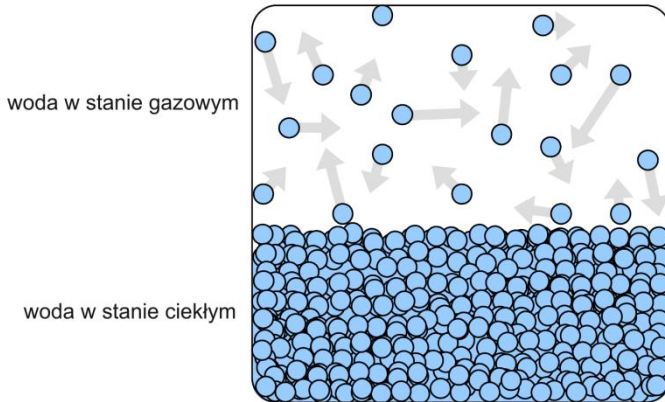
- [1] Nota katalogowa czujników SHT1x. Sensirion – the sensor company.
- [2] Noty aplikacyjne czujnika SHT10 (Sensirion):
 - *Humidity at a Glance – Most relevant Equations with sample code*,
 - *Introduction to Humidity – Basic Principles on Physics of Water Vapor*,
 - *CRC checksum*,
 - *Application note – sample code*,
- [3] U. Tietze, Ch. Schenk. *Układy Półprzewodnikowe*. WNT, Warszawa, 1996.
- [4] R. Lyons. *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKiŁ, 2006.
- [5] T. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań*. WKiŁ, 2002.
- [6] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Wprowadzenie

I. Wilgotność

Rozważmy zamknięte naczynie, w którym znajduje się woda i powietrze. Temperatura wpływa na średnią energię kinetyczną cząsteczek wody. Statystycznie niektóre z cząsteczek posiadają energię wyższą niż średnia i na tyle wysoką, że mogą uciec z płynu (rys. 1). Proces ten nazywa się parowaniem. Po pewnym czasie sytuacja ustabilizuje się – ilość

cząsteczek wody wyparowujących jest dokładnie taka sama jak ilość cząsteczek wpadających powrotem do płynu. Wtedy statystycznie rzecz biorąc liczba cząsteczek wody w gazie jest stała, a cząsteczki wywierają pewne ciśnienie na ściany naczynia. Zanim wprowadzone zostaną wielkości charakteryzujące wilgotność należy wprowadzić pojęcie ciśnienia cząstkowego.



Rys. 1. Ilustracja cząsteczek płynu w zamkniętym pojemniku [2].

Ciśnienie cząstkowe (prężność)

Definicja: ciśnienie, jakie wywierałby dany składnik mieszaniny gazów (tu: para wodna), gdyby w tej samej temperaturze sam zajmował objętość całej mieszaniny. Na podstawie równania Clapeyrona wzór na prężność pary wodnej wynosi:

$$e = p_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{V} RT \quad (1)$$

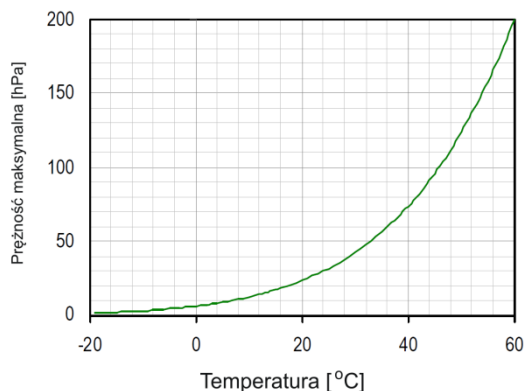
gdzie: e - ciśnienie cząstkowe (prężność) pary wodnej, n_{H_2O} - liczba moli pary wodnej, R - uniwersalna stała gazowa, T - temperatura [K], V - objętość mieszaniny gazowej.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu jest jednym ze składników całkowitego ciśnienia powietrza.

$$p = p_{nitrogen} + p_{oxygen} + p_{others} + e \quad (2)$$

gdzie: p - ciśnienie całkowite powietrza, $p_{nitrogen}$ - ciśnienie cząstkowe azotu, p_{oxygen} - ciśnienie cząstkowe tlenu, p_{others} - suma ciśnień cząstkowych pozostałych składników powietrza, e - prężność pary wodnej.

Można wyróżnić prężność aktualną (e) i prężność maksymalną lub nasycającą (E) która określa największą wartość ciśnienia jaka może wystąpić w danych warunkach zanim rozpocznie się kondensacja. Prężność maksymalna rośnie wraz z temperaturą (rys. 2).



Rys. 2. Prężność maksymalna (nasycająca) w funkcji temperatury [2].

Wilgotność określa ilość pary wodnej w gazie (np. powietrzu). Istnieje wiele różnych sposobów określenia tej wielkości. Wymienione poniżej przykładowe wielkości są najbardziej popularnymi [2]. Przy każdej z nich oprócz definicji podano sposób jej wyliczenia, na podstawie wielkości mierzonych wprost przez czujniki zintegrowane (wilgotność bezwzględna, temperatura, ciśnienie).

Wilgotność względna

Definicja: stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej e zawartej w powietrzu do prężności nasycającej E w tej samej temperaturze.

$$U_w(t) = \frac{e}{E(t)} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: $U_w(t)$ – wilgotność względna w temperaturze t , e – aktualna prężność pary wodnej, $E(t)$ – prężność maksymalna w danej temperaturze.

Punkt rosy (*dew point*)

Definicja: Temperatura, w której przy danym ciśnieniu gazu rozpoczyna się proces skraplania.

Wzór przeliczeniowy:

$$t_d(t, RH) = \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot t}{T_n + t}}{m - \left[\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot t}{T_n + t}\right]} \quad (4)$$

gdzie: t_d - punkt rosy [°C], t - temperatura otoczenia [°C], RH - wilgotność względna [%], $m = 17,62$, $T_n = 243,12$ [°C].

Wilgotność bezwzględna (*absolute humidity*)

Definicja: masa pary wodnej wyrażona w gramach zawarta w 1 m³ powietrza.

$$d_v = \frac{m_{H_2O}}{V} \quad (5)$$

Wzór przeliczeniowy:

$$d_v(t, RH) = 216,7 \cdot \left[\frac{\frac{RH}{100\%} \cdot A \cdot e^{\frac{m \cdot t}{T_n + t}}}{273,15 + t} \right] \quad (6)$$

gdzie: d_v – wilgotność bezwzględna [$\frac{g}{m^3}$], t - temperatura otoczenia [°C], RH - wilgotność względna [%], $m = 17,62$, $T_n = 243,12$ [°C], $A = 6,112$ hPa.

Stosunek mieszania (*mixing ratio*)

Definicja: stosunek masy pary wodnej M_{H_2O} do masy suchego powietrza M_{dryair} w danej próbce.

$$r = \frac{M_{H_2O}}{M_{dryair}} \quad (7)$$

Wzór przeliczeniowy:

$$r(t, RH) = \frac{622 \cdot \frac{RH}{100\%} \cdot A \cdot e^{\frac{m \cdot t}{T_n + t}}}{p - \frac{RH}{100\%} \cdot A \cdot e^{\frac{m \cdot t}{T_n + t}}} \quad (8)$$

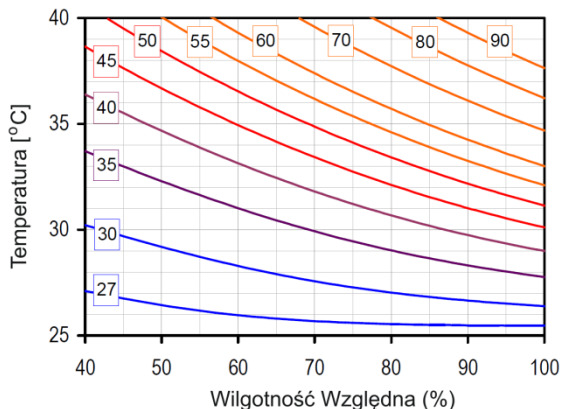
gdzie: r - stosunek mieszania [$\frac{g}{kg}$], p – ciśnienie atmosferyczne [hPa].

Indeks ciepły (*heat index*)

Miara temperatury odczuwalnej przez człowieka. Wyraża on łączny wpływ temperatury powietrza i wilgotności względnej na subiektywne odczucia gorąca i duchoty. Wielkość ta wskazuje w danych warunkach jak czulibyśmy się, gdyby powietrze było suche (rys. 3). Miara ta jest czysto subiektywna i ma sens jedynie powyżej 25 °C i wilgotności względnej 40%. Najbardziej rozpowszechnioną jest definicja stosowana przez NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

$$HI = -8,7847 + 1,6114 \cdot t + 2,3385 \cdot U_w - 0,1461 \cdot t \cdot U_w - 0,0123 \cdot t^2 - 0,0164 \cdot U_w^2 + \quad (9)$$

$$+ 2,2117 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 \cdot U_w + 7,2546 \cdot 10^{-4} \cdot t \cdot U_w^2 - 3,35820 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \cdot U_w^2$$



Rys. 3. Zależność wartości indeksu cieplnego od temperatury i wilgotności względnej [2].

Tabela 1

Dane ilustrujące subiektywne odczucie dyskomfortu dla poszczególnych wartości indeksu cieplnego

Indeks Ciepły	Stopień dyskomfortu termiczno-wilgotnościowego
20-29 °C	Komfortowo
30-39 °C	Niewielki dyskomfort
40-45 °C	Duży dyskomfort
45-54 °C	Niebezpiecznie
powyżej 54 °C	Udar cieplny nieuchronny

Wzór przeliczeniowy:

$$HI(t, RH) = t + \frac{5}{9} \cdot \left[\frac{RH}{100\%} \cdot e^{\frac{m \cdot t}{T_n + t}} - 10 \right] \quad (10)$$

gdzie: HI – indeks cieplny [°C].

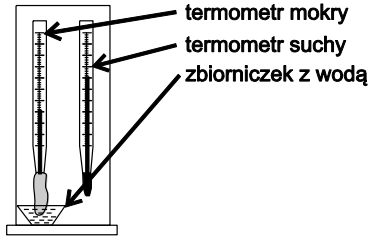
II. Rodzaje czujników wilgotności

Wielkości związane z wilgotnością mogą być mierzone z wykorzystaniem różnych przyrządów. Poniższe zestawienie zawiera wybrane rodzaje czujników wilgotności z krótkim opisem zasady ich działania.

Czujniki mechaniczne:

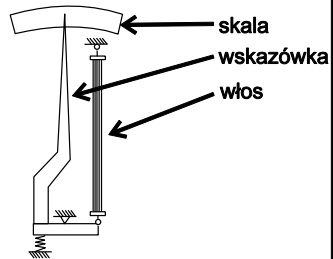
psychrometry

Wykorzystuje zjawisko hamowania parowania przez powietrze wilgotne. Różnicę wskazań termometru suchego i wilgotnego można za pomocą tablic psychometrycznych przeliczyć na wilgotność względną.



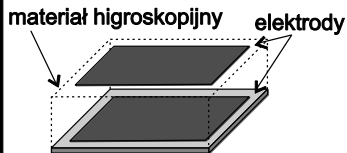
higrometr włosowy

Wykorzystuje zjawisko zmiany długości włosa pod wpływem wilgotności. Do włosa przymocowana jest wskazówka wskazująca na specjalnie przygotowanej skali aktualną wilgotność względną.



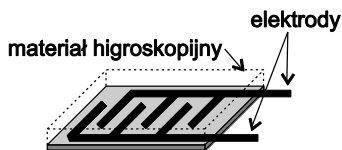
Czujniki elektroniczne:

pojemnościowe



Zmiana stałej dielektrycznej materiału higroskopijnego na skutek zmiany wilgotności powoduje zmianę pojemności kondensatora

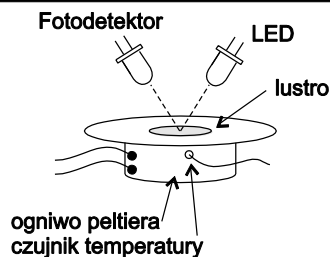
rezystancyjne



Zmiana przewodności higroskopijnego materiału na skutek zmiany wilgotności

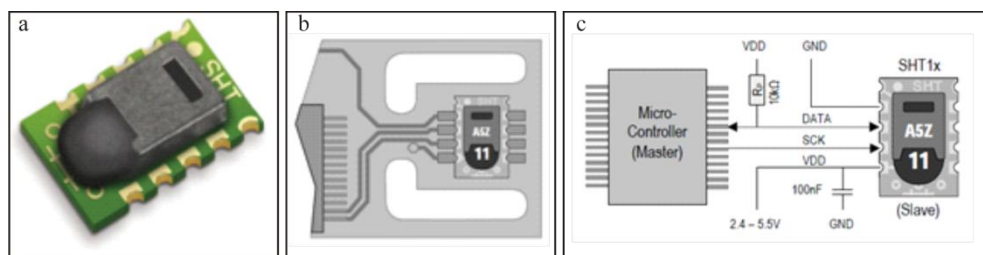
z chłodzonym lustrem

Wykrywa punkt rosy. Lustro jest schładzane aż do momentu skroplenia pary wodnej na jego powierzchni. Elementem chłodzącym jest najczęściej ogniwo Peltiera.



III. Czujnik wilgotności i temperatury SHT10

Czujnik SHT10 jest zintegrowanym czujnikiem temperatury i wilgotności względnej (rys. 4a). Ponieważ wilgotność silnie zależy od temperatury, dlatego istotne jest aby obie wielkości były mierzone w tym samym momencie oraz aby temperatura czujnika odpowiadała temperaturze powietrza. Dlatego zalecane jest, aby uniknąć nagrzewania czujnika zarówno wewnątrz (np. na skutek zbyt częstego pomiaru) jak i zewnątrz poprzez odizolowanie czujnika na płytce drukowanej od sąsiednich układów mogących generować ciepło (rys. 4b). Oprócz pojemnościowego czujnika wilgotności i temperatury typu *band-gap*, układ zawiera wzmacniacz, przetwornik analogowo-cyfrowy, pamięć i cyfrowy interfejs.



Rys. 4. Czujnik SHT10, a) widok zewnętrzny b) zalecana forma izolacji czujnika od źródeł ciepła, c) sposób podłączenia czujnika do systemu nadrzędnego [1].

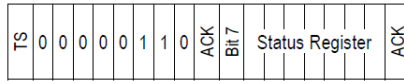
Cyfrowy interfejs

Dwuprzewodowy interfejs cyfrowy czujnika został zoptymalizowany dla potrzeb odczytu i konfiguracji czujnika przy zachowaniu niskiego poboru mocy. Składa się on z dwóch linii: SCK – linia zegara i DATA – dwukierunkowa linia danych (rys. 4c).

Linia zegarowa jest używana do synchronizacji komunikacji pomiędzy układem nadrzędnym, a czujnikiem. Linia DATA natomiast służy do transmisji danych z i do czujnika. Ponieważ linia jest dwukierunkowa dozwolone jest jej sterowanie tylko stanem niskim. Niebezpieczna jest bowiem sytuacja, gdyby w jednym momencie układ nadrzędny wymuszał stan wysoki, a czujnik stan niski.

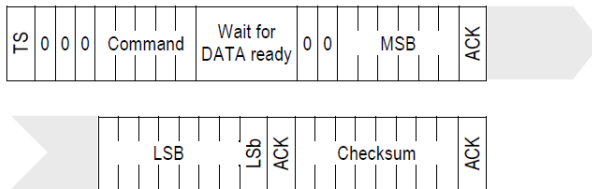
Każda transmisja danych jest inicjowana przez system nadrzędny poprzez wygenerowanie odpowiedniej sekwencji stanów na obu liniach (TS – *transmission start*). Po której następuje transmisja 3-bitowego adresu *address* (zawsze '000') i 5-bitowej komendy *command* (np. zapis lub odczyt z rejestru statusowego, pomiar temperatury, pomiar wilgotności względnej). Odpowiednie komendy znajdują się w dokumentacji czujnika [1]. Zaraz po transmisji komendy czujnik powinien odpowiedzieć wymuszając niski stan linii (ACK). W tym momencie warto dodać, że sygnał ACK powinien być generowany zarówno przez system nadrzędny jak i czujnik w zależności od kierunku transmisji. Dalsza część transmisji zależy od komendy.

Przykładowo, w przypadku zapisu do rejestru statusowego od razu po otrzymaniu sygnału ACK należy dokonać wpisu 8 bitowej wartości po której czujnik znów powinien odpowiedzieć sygnałem ACK (rys. 5).



Rys. 5. Ramka danych w przypadku zapisu do rejestru statusowego [1].

W przypadku komend „pomiar temperatury” lub „pomiar wilgotności” po nadaniu komendy system nadrzędny powinien odczekać aż pomiar się zakończy (czujnik poinformuje o tym fakcie wymuszając stan niski na linii danych) (rys. 6). Następnie system powinien rozpocząć generację odpowiedniej ilości cykli zegara na linii SCK, w trakcie której czujnik przesyła kolejno: 8 bardziej znaczących bitów danych, 8 mniej znaczących bitów danych, a następnie 8 bitów sumy kontrolnej. Po każdej 8-bitowej transmisji system nadrzędny powinien wygenerować sygnał ACK (rys. 5, rys. 6).



Rys. 6. Standardowa ramka transmisji danych [1].

Suma kontrolna

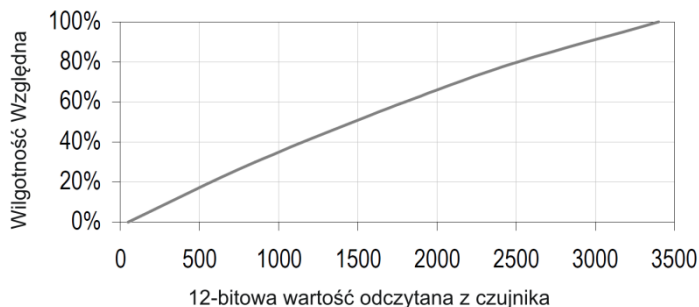
Czujnik do przesyłanych danych dołącza sumę kontrolną CRC (*Cyclic Redundancy Check*). Jest to wielkość obliczana na podstawie binarnego obrazu ramki przesyłanych danych w ściśle określony sposób (patrz: *CRC Checksum* [2]). Jest to zabieg pozwalający na wykrycie błędów w transmisji danych, bardzo często stosowany w interfejsach cyfrowych, z powodu wysokiej efektywności i niewielkich zasobów potrzebnych do jego zastosowania.

Kontrola poprawności transmisji dokonywana jest w następujący sposób. W odbiorniku, na podstawie przychodzących danych liczona jest na nowo suma kontrolna (w ten sam sposób jak w czujniku) która jest następnie porównywana z sumą przesłaną przez czujnik. Jeśli te dwie wartości są zgodne oznacza to, że z bardzo dużym prawdopodobieństwem transmisja jest poprawna.

Stosuje się dwa rodzaje implementacji algorytmów obliczających sumę kontrolną: liczące bit po bicie oraz bajt po bajcie (patrz: *CRC Checksum* [2]).

Skalowanie, korekcja liniowości i kompensacja temperaturowa

O ile czujnik jest wewnętrznie skalibrowany i odczytaną z czujnika wartość po pomnożeniu przez współczynnik skalujący (z dokumentacji czujnika) można traktować jako wynik pomiaru, to w celu uzyskania maksymalnej dokładności zalecana jest programowa korekcja wyniku. Czujnik wykazuje pewną nieliniowość pomiaru wilgotności względnej oraz zależność od temperatury (szczególnie dla temperatur znacznie różniących się od 25 °C).



Rys. 7. Ilustracja nieliniowości czujnika. Zależność wilgotności względnej od wartości wskazywanej przez czujnik [1].

Zarówno korekcję liniowości jak i kompensację temperaturową można dokonać w sposób programowy, odpowiednio przeliczając wartości odczytane z czujnika wykorzystując współczynniki podane w jego dokumentacji.

Wzór na korekcję liniowości:

$$RH_{\text{linear}} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \quad (11)$$

gdzie RH_{linear} – wielkość wilgotności po skorygowaniu nieliniowości, SO_{RH} – wartość odczytana z czujnika, c_1, c_2, c_3 - odpowiednie współczynniki [1].

Wzór na korekcję temperatury:

$$RH_{\text{true}} = (T_{\text{C}} - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{\text{linear}} \quad (12)$$

gdzie RH_{true} – wilgotność względna po korekcji liniowości i skompensowaniu temperaturowym, T_{C} – temperatura otoczenia, SO_{RH} – wielkość wilgotności odczytana z czujnika, RH_{linear} – wilgotność po korekcji liniowości, t_1, t_2 – odpowiednie współczynniki [1].

Pomiar temperatury z wykorzystaniem sensora typu *band-gap* jest bardzo liniowy i nie wymaga korekcji oprócz przeskalowania. Aby uzyskać temperaturę na podstawie wielkości odczytanej z czujnika należy zastosować poniższy wzór. Współczynniki podane są w dokumentacji czujnika.

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (13)$$

gdzie: T – temperatura, d_1, d_2 - odpowiednie współczynniki skalujące, SO_T – wartość odczytana z czujnika.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Nawiązanie komunikacji z czujnikiem

Należy odłączyć terminal karty pomiarowej od komputera. Następnie podłączyć czujnik do odpowiednich złączy terminala. Przed ponownym podłączeniem terminala do komputera należy wezwać prowadzącego celem weryfikacji poprawności połączeń.

Przygotować program umożliwiający zapis i odczyt danych z czujnika. Na tym etapie użytkownik powinien móc ręcznie wybrać komendę oraz daną do zapisu, a także wyświetlić dane zwrócone przez czujnik. Należy zaimplementować funkcjonalność sprawdzania poprawności otrzymanych danych za pomocą sumy kontrolnej.

Należy wykonać próbę komunikacji:

- odczyt i zapis rejestru statusowego,
- realizacja pojedynczych pomiarów temperatury i wilgotności.

Ad 2. Pomiar temperatury i wilgotności względnej

Należy przygotować oprogramowanie, którego zadaniem jest odpowiednia konfiguracja czujnika, odczyt wartości temperatury i wilgotności względnej uwzględniając korekcję nieliniowości i kompensację temperaturową. Program po uruchomieniu powinien w sposób ciągły dokonywać pomiaru tych wielkości i wyświetlać je na ekranie zarówno w postaci cyfrowej, jak i na wykresach czasowych.

Ad 3. Wyznaczenie innych wielkości związanych z wilgotnością

Należy dodać do oprogramowania funkcjonalność wyznaczającą na podstawie wskazań czujnika następujące wielkości pochodne:

- punkt rosy,
- wilgotność bezwzględna,
- indeks cieplny,
- stosunek zmieszania.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową NI i oprogramowaniem LabVIEW,
2. Zestawy laboratoryjne do zadawania i pomiaru ciśnienia,
3. Moduły zintegrowanych czujników do pomiaru ciśnienia.

Ćwiczenie 8

Czujniki ciśnienia

Program ćwiczenia

1. Kalibracja i pomiar ciśnienia:
 - a. różnicowego,
 - b. względnego (względem ciśnienia atmosferycznego),
 - c. bezwzględnego.
2. Obserwacja zmian wskazań czujników w warunkach zmiennego ciśnienia.

Zakres wymaganych wiadomości

Rodzaje i zasada działania zintegrowanych czujników ciśnienia, podstawy sensoryki (wstępne przetwarzanie, kalibracja, wzorcowanie, układy mostkowe).

Literatura

- [1] Noty katalogowe czujników (Motorola Semiconductor / Freescale Semiconductor):
 - MPX2100,
 - MPX5100,
 - MPX2050.
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk. *Układy Półprzewodnikowe*. WNT, Warszawa, 1996.
- [3] www.sensorland.com
- [4] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

Wprowadzenie

I. Ciśnienie

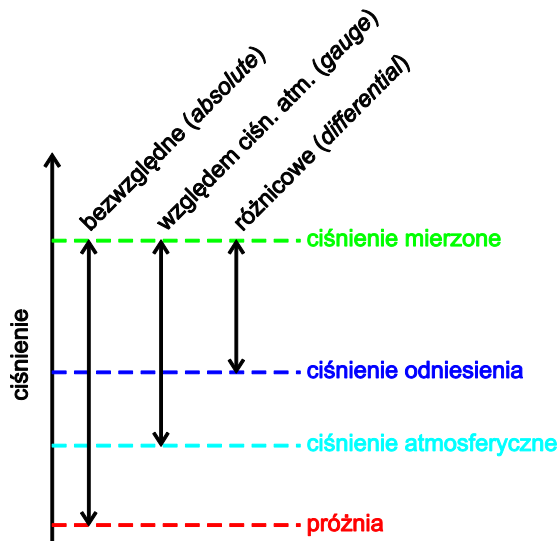
Ciśnienie jest to z definicji wielkość określająca wartość siły działającej prostopadle do powierzchni na jednostkę powierzchni.

$$p = \frac{F_n}{S} \quad (1)$$

gdzie: p - ciśnienie [Pa], F_n - siła prostopadła do powierzchni [N], S - powierzchnia [m^2].

Może być ono mierzone na trzy sposoby (rys. 1):

- względem próżni (0 Pa) – są to czujniki ciśnienia bezwzględnego lub manometry ciśnienia bezwzględnego (*absolute pressure sensor*),
- względem innego ciśnienia – są to czujniki różnicowe (*differential pressure sensor*),
- względem ciśnienia atmosferycznego – jest to szczególny przypadek czujnika ciśnienia różnicowego, przy czym drugi terminal czujnika jest otwarty na otoczenie. Są to najbardziej rozpowszechnione czujniki ciśnienia i najczęściej zwane są manometrami (*pressure gauge*).



Rys. 1. Ilustracja sposobów pomiaru ciśnienia.

Zastosowań czujników ciśnienia jest wiele: od sterowników pomp, robotów, systemów monitorujących hydrauliczne i pneumatyczne sieci przesyłowe, wskaźników poziomu aż do urządzeń diagnostyki medycznej i nieinwazyjnego pomiaru ciśnienia krwi.

Jako komentarz do tabeli zbiorczej jednostek ciśnień warto dodać, że atmosfera fizyczna odpowiada średniemu ciśnieniu atmosferycznemu na poziomie morza, a więc $1 \text{ atm} = 101,3 \text{ hPa} = 760 \text{ mmHg} = 1,013 \text{ bar} = 14,69 \text{ psi}$.

II. Historia czujników ciśnienia [3]

1644 r. – Evangelista Torricelli (Włochy) wykonał eksperyment z rurką o długości 1 metra zamkniętą z jednej strony, wypełnioną rtęcią tak, że na zamkniętym końcu nie ma

Tabela 1

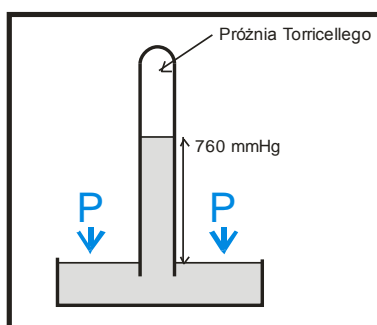
Tabela porównawcza jednostek ciśnienia.

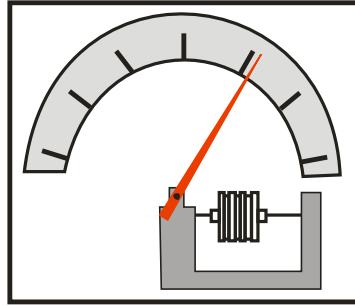
Tabela porównawcza jednostek ciśnienia	
1 Pa [N/m ²]	10 ⁻⁵ [bar]
	10 ⁻⁶ [N/mm ²]
	0,102 [kG/m ²]
	0,102·10 ⁻⁴ at (atmosfera techniczna) [kG/cm ²]
	0,987·10 ⁻⁵ atm (atmosfera fizyczna)
	0,0075 tor [Tr]
	0,0075 [mmHg]
	145,04·10 ⁻⁶ [psi]

powietrza, której drugi koniec jest zanurzony w naczyniu również z rtęcią (rys. 2). Zauważył on, że rtęć opada w rurce do poziomu ok. 760mm zostawiając u góry puste miejsce (tzw. próżnię Torricellego). Stwierdził, że zjawisko to pochodzi od „siły na powierzchni ziemi” jednak nie powiązał tego z ciśnieniem atmosferycznym. Od jego nazwiska pochodzi również jednostka miary ciśnienia 1 Tor = 1 mmHg.

1648 r. – Blaise Pascal zinterpretował wyniki pracy Torricellego i stwierdził, że ta „siła” to waga powietrza znajdującego się nad przyrządem. Swoją teorię potwierdził dokonując pomiaru na różnych wysokościach nad poziomem morza. On pierwszy użył nazwy „ciśnienie atmosferyczne”.

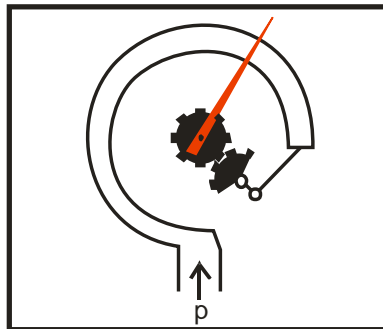
1843 r. – Lucien Vidie (Francja) wynajduje urządzenie zwane **aneroidem** (rys. 3). Składa się ono ze szczelnie zamkniętej puszkii membranowej (tzw. Puszka Vidiego) - naczynia z rozrzedzonym powietrzem. Zmiana ciśnienia otoczenia powoduje odkształcanie puszkii, a wskazówka sprzężona mechanicznie z puszką wskazuje na odpowiednio wyskalowanej podziałce aktualne ciśnienie. Aneroid jest stosowany w barometrach, barografach i wysokościomierzach lotniczych, a więc do pomiarów ciśnień atmosferycznych.

**Rys. 2.** Eksperyment Torricellego.



Rys. 3. Barometr z aneroidem.

1849 r. – Eugene Bourdon patentuje tzw. **Rurkę Bourdona**. Jest ona głównym elementem manometrów sprężynowych rurkowych. Jest to wygięta w łuk lub więcej zwojów rurka pusta w środku. Wskutek ciśnienia wywieranego na wewnętrzne ścianki rurki przez mierzone ciśnienie rurka odkształca się (prostuje się) poruszając sprzężoną z nią mechanicznie wskazówkę. Tzw. Manometry Bourdona są obecnie najczęściej stosowanymi manometrami, szczególnie w przemyśle.



Rys. 4. Manometr z rurką Bourdona.

1930 r. – Początki elektrycznych pomiarów ciśnień.

1938 r. – Opracowano pierwsze tensometry (E.E. Simmons). Dzięki temu mogły powstać pierwsze **membranowe czujniki ciśnienia**. W czujnikach tych odchylenie membrany zależne od ciśnień panujących po obu jej stronach jest mierzone za pomocą tensometrów naklejanych na jej powierzchnię. Tensometry zmieniają swoją rezystancję w zależności od mechanicznego naprężenia działającego na nie. Tensometry często łączy się w mostek kompensując w ten sposób wpływ temperatury, a także zwiększając czułość pomiaru.

1965 r. – Pierwsze cienkowarstwowe tensometry ze zintegrowanym pełnym mostkiem są kolejnym krokiem do miniaturyzacji czujników ciśnienia.

1973 r. – Pojawiły się pierwsze **pojemnościowe czujniki** oparte na szkle lub kwarcu, a kilka lat później na ceramice. Czujniki pojemnościowe opierają się na zmianie pojemności kondensatora, którego np. jedna z okładek jest membraną odkształcaną

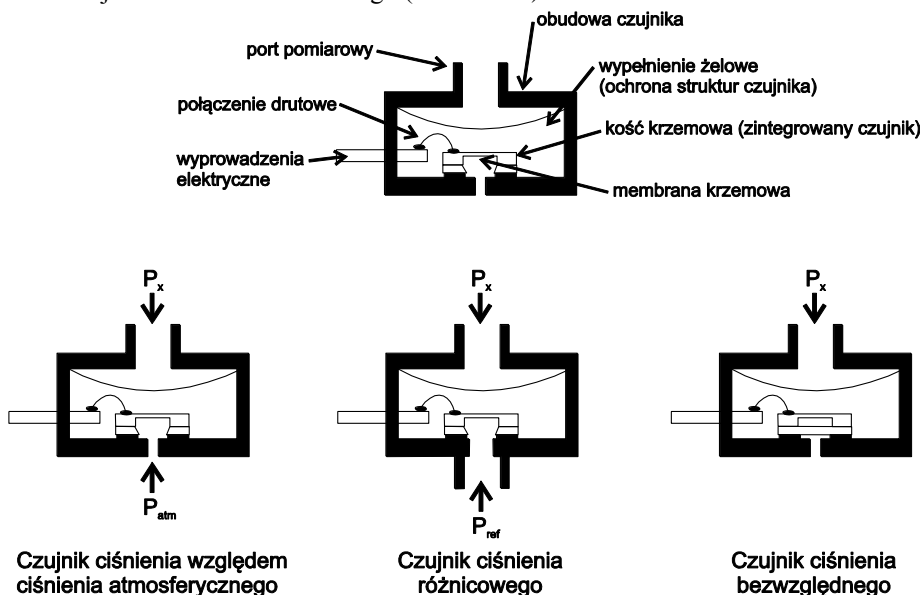
wskutek działającego ciśnienia. Ceramiczne czujniki pojemnościowe są często stosowane do pomiarów niższych ciśnień, a ich niewątpliwą zaletą jest zdolność do wytrzymania przeciążeń znacznie przekraczających nominalny zakres działania czujnika.

1969 – Pierwsze scalone czujniki ciśnienia oparte na membranach krzemowych (Honeywell).

III. Budowa krzemowych czujników ciśnienia

Krzemowe membranowe czujniki ciśnienia, jak każdy czujnik membranowy mierzą różnicę ciśnień występującą pomiędzy obiema stronami membrany. W zależności od konstrukcji obudowy czujnika można otrzymać trzy rodzaje czujników (rys. 5):

- czujniki ciśnienia bezwzględnego (absolute),
- czujniki ciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego (gauge),
- czujniki ciśnienia różnicowego (differential).

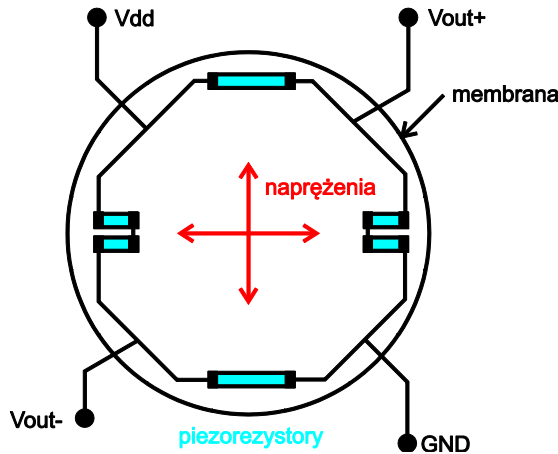


Rys. 5. Budowa czujników ciśnienia na podstawie czujników serii MPX [1].

Różnica pomiędzy dwoma ostatnimi czujnikami jest niewielka i właściwie sprowadza się do obecności jawnego portu do podłączenia ciśnienia referencyjnego. W przypadku czujnika ciśnienia bezwzględnego ciśnieniem referencyjnym jest próżnia. Komora próżniowa jest tworzona na etapie produkcji czujnika, po czym jest hermetycznie zamykana tworząc ciśnienie odniesienia.

Układ czujnika zawiera membranę krzemową, na której utworzone są struktury piezorezystorów (struktur półprzewodnikowych, których rezystywność zależy od naprężeń mechanicznych działających na nie). Najczęściej tworzą one grupę czterech czujników ułożonych przeciwstawnie tak, aby dwa z nich były rozciągane, a pozostałe dwa służyły

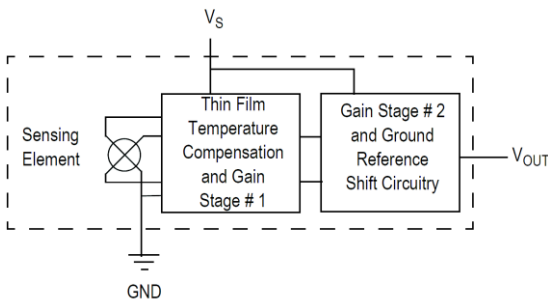
tylko do kompensacji temperatury (rys. 6). Konfigurując takie tensometry piezorezystywne w mostek Wheatstone'a można nie tylko uniezależnić się od wpływu temperatury, ale również dwukrotnie zwiększyć czułość mostka w porównaniu do zastosowania np. jednego piezorezystora. Niemniej jednak różne firmy stosują różne rozwiązania.



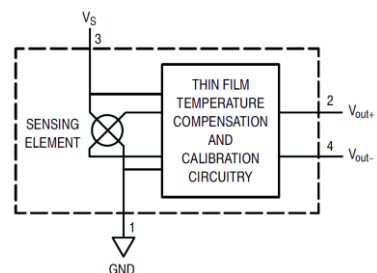
Rys. 6. Przykład rozmieszczenia piezorezystorów na membranie.

Czujniki serii MPX (Freescale Semiconductor) występują w wielu odmianach. Każda rodzina pozwala na pomiar w trzech wymienionych wcześniej wariantach. Poza zakresem pracy różnią się między innymi stopniem integracji czujnika. Część czujników zawiera tylko membranę z układem piezorezystorów i układy kompensacyjno-kalibrujące (rys. 7). Wymaga to zastosowania dodatkowo zewnętrznych układów wzmacniających. Istnieją również rodziny, które poza wspomnianymi obwodami zawierają dodatkowo układy wzmacniające i korekcji zera. Dzięki temu czujnik taki można bez żadnych specjalnych zabiegów podłączyć np. do mikrokontrolera.

Budowa czujnika MPX5100



Budowa czujnika MPX2050



Rys. 7. Elementy funkcjonalne czujników z różnych rodzin MPX [1].

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Kalibracja czujnika i pomiar ciśnienia

Należy odłączyć terminal karty pomiarowej od komputera. Następnie podłączyć czujnik do odpowiednich złączy terminala (na podstawie dołączonej dokumentacji). Przed ponownym podłączeniem terminala do komputera należy wezwać prowadzącego celem weryfikacji poprawności połączeń.

Przygotować program, którego zadaniem będzie ciągły pomiar ciśnienia (odpowiedniego do rodzaju zastosowanego czujnika). Należy przedstawić mierzoną wartość w różnych jednostkach ciśnienia (patrz tabela 1). Na podstawie wskazań analogowych ciśnieniomierzy dwupunktowo skalibrować czujnik na poziomie oprogramowania.

Ad 2. Obserwacja zmian wskazań czujników w warunkach zmiennego ciśnienia

Wykorzystując zadajniki ciśnienia i przygotowane oprogramowanie należy obserwować zmiany wskazań czujników ciśnienia.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową NI i oprogramowaniem LabVIEW,
2. Zestawy laboratoryjne do zadawania i pomiaru ciśnienia,
3. Moduły zintegrowanych czujników do pomiaru ciśnienia.

Ćwiczenie 9

Inteligentny czujnik wiatru

Program ćwiczenia

1. Przygotowanie stanowiska i połączeń,
2. Rejestracja charakterystyki prędkości powietrza w funkcji napięcia zasilania dmuchawy,
3. Wyznaczenie charakterystyki mierzonego kierunku przepływu powietrza w funkcji kąta obrotu czujnika,
4. Wyznaczenie charakterystyki przekroju strumienia powietrza,
5. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej czujnika,
6. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej układu czujnik-symulator wiatru.

Zakres wymaganych wiadomości

Rodzaje i zasada działania czujników kierunku i siły wiatru, podstawy sensoryki (wstępne przetwarzanie, kalibracja, wzorcowanie).

Literatura

- [1] Nota katalogowa czujnika MMW-005.
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk. *Układy Półprzewodnikowe*. WNT, Warszawa, 1996.
- [3] K. A. A. Makinwa, J. H. Huijsing. *A Smart Wind Sensor using Time-Multiplexed Thermal $\Sigma\Delta$ Modulators*. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, p. 15-20, 2002.
- [4] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Zielona Góra, 2006.
- [5] T. Grudnik. *Stanowisko laboratoryjne do badania inteligentnego czujnika prędkości i kierunku wiatru*. Praca Magisterska, AGH, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, 2009.
- [6] P. Gryboś. *Zintegrowane czujniki pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, 2010.

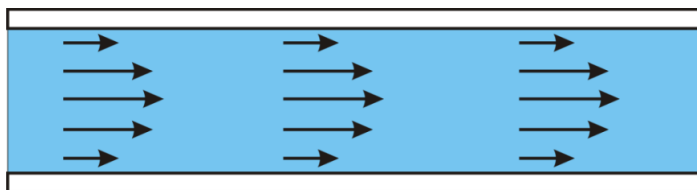
Wprowadzenie

I. Wielkości związane z przepływem

Przepływ płynu można zdefiniować jako ruch, który powoduje jego przemieszczenie pomiędzy dwoma obszarami, przy czym płynem nazywamy dowolne medium znajdujące się w stanie ciekłym lub gazowym. Ze względu na kinematykę ruchu, przepływ płynów można podzielić na:

- przepływ laminarny (warstwowy),
- przepływ turbulentny (wirowy).

O przepływie laminarnym mówimy wtedy, gdy kolejne warstwy płynu nie mieszają się w kierunku poprzecznym. Przykładowo, w rurze o stałym przekroju cząsteczki poruszają się po torach prostych, równoległych do ścianek rury ruchem jednostajnym prostoliniowym (rys. 1).



Rys. 1. Ruch laminarny w rurze o stałym przekroju.

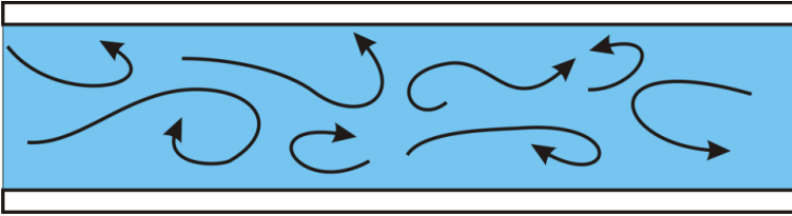
Przepływ laminarny może zachodzić jeśli tzw. liczba Reynoldsa nie przekracza wartości krytycznej [4]:

$$\text{Re} = \frac{v_{sr} \cdot D \cdot \rho}{\eta} \leq 2300 \quad (1)$$

gdzie: Re - liczba Reynoldsa, $v_{sr} = \frac{1}{S} \int V ds$ - średnia prędkość przepływającego płynu, S - przekrój poprzeczny rurociągu, D - średnica rurociągu, η - współczynnik lepkości dynamicznej, ρ - gęstość [kg/m^3].

Przepływ turbulentny występuje, gdy liczba Reynoldsa przekracza wartość 2800. Dla zakresu, w którym liczba Reynoldsa znajduje się w przedziale 2300 – 2800 charakter przepływu nie jest jednoznacznie określony [4], przy czym wartości te mają charakter umowny i mogą być inne w różnych opracowaniach.

W trakcie przepływu turbulentnego ruch poszczególnych cząsteczek jest nieregularny i chaotyczny, przy czym przemieszczenie płynu następuje zgodnie z głównym kierunkiem.



Rys. 2. Ilustracja ruchu cząsteczek dla przepływu turbulentnego.

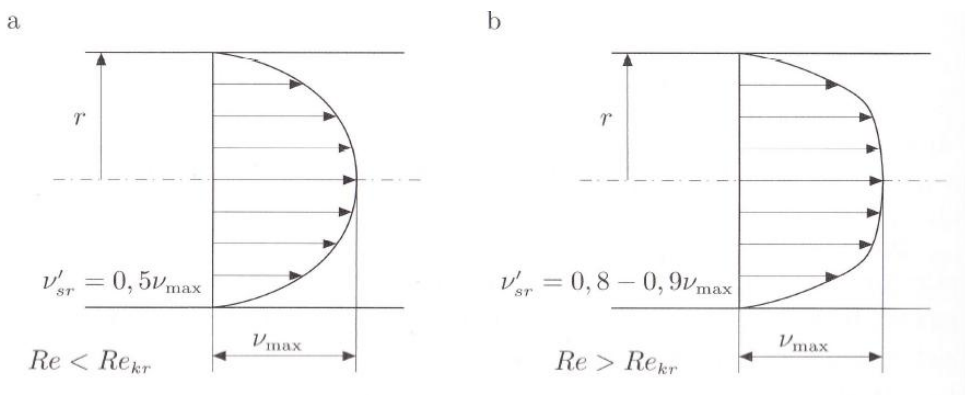
Natężenie przepływu jako wielkość będąca miarą ilości płynu przepływającego przez przekrój poprzeczny w jednostce czasu występuje jako [4]:

- **masowe natężenie przepływu (wydatek masowy) q_m** – stosunek ilości masy płynu do czasu, w którym masa ta przepływa. Najczęściej wyrażany w kg/s.
- **objętościowe natężenie przepływu q_v** – stosunek objętości płynu do czasu w którym płyn o danej objętości przepływa przez dany przekrój poprzeczny. Najczęściej wyraża się w m^3/s .

Wielkością łączącą masowe i objętościowe natężenie przepływu jest gęstość płynu ρ [kg/m^3].

$$q_m = q_v \cdot \rho \quad (2)$$

Warto zwrócić uwagę na fakt, że rozkład przestrzenny prędkości cząsteczek np. w rurze nie jest równy dla przepływu laminarnego. Wskutek lepkości płynu prędkość cząsteczek bliżej ścianek rury będzie mniejsza niż z dala od tych ścian. Na rozkład ten wpływa również liczba Reynoldsa (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład przestrzenny prędkości cząsteczek dla przepływu laminarnego i turbulentnego [4];
 r – promień rurociągu, v'_{sr} – średnia prędkość płynu, Re – liczba Reynoldsa, Re_{kr} – wartość krytyczna liczby Reynoldsa, v_{max} – maksymalna prędkość w płynie.

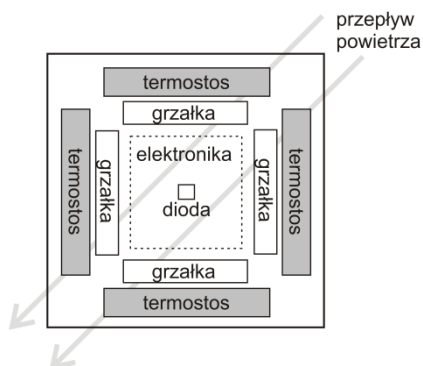
II. Inteligentny czujnik wiatru

Czujnik MMW 005 jest zintegrowanym, inteligentnym czujnikiem kierunku i siły wiatru (rys. 4). Jest on zbudowany na bazie płytki ceramicznej z układem scalonym. W odróżnieniu od tradycyjnych czujników wiatru nie ma on części ruchomych co znacznie przedłuża jego bezawaryjną pracę. Układ scalony podgrzewany przez wbudowane elementy grzejne tak, aby jego temperatura była zawsze nieco wyższa niż temperatura otoczenia (ok. 10K).



Rys. 4. Inteligentny czujnik wiatru MMW 005 [1].

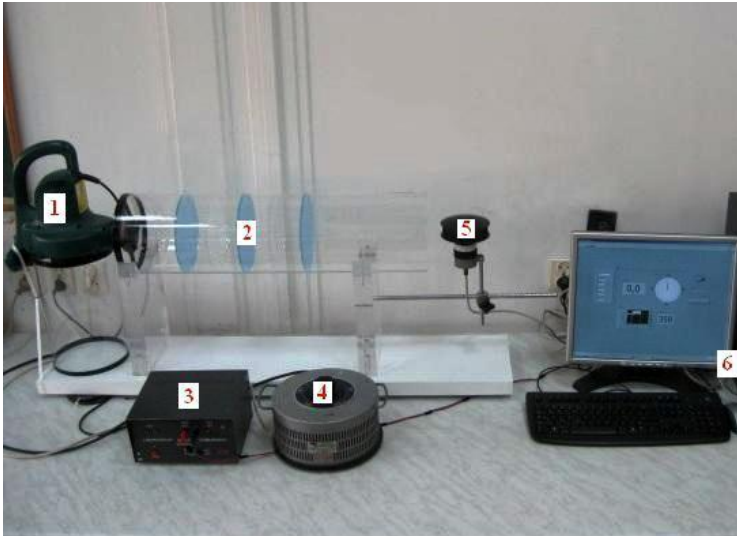
Cztery termopary umieszczone blisko grzałek przy każdej krawędzi układu scalonego, służą do pomiaru różnicy temperatur pochodzącej od przepływu powietrza. Dodatkowa dioda umieszczona centralnie służy do pomiaru temperatury układu scalonego. Gdy występuje obieg powietrza, powstająca różnica wskazań temperatury pozwala na określenie zarówno kierunku jak i siły wiatru (rys. 5). Kształt obudowy zapewnia, że wiatr opływa czujnik w odpowiedni sposób, a także chroni go przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (Klasa szczelności IP-65).



Rys. 5. Budowa inteligentnego czujnika wiatru (układ scalony) [3].

Sygnaly z termopar są następnie odpowiednio przetwarzane w mikroprocesorze. Z czujnikiem można komunikować się przez cyfrowy, szeregowy interfejs RS422.

III. Stanowisko laboratoryjne



Rys. 6. Stanowisko laboratoryjne do badania inteligentnego czujnika wiatru [5].

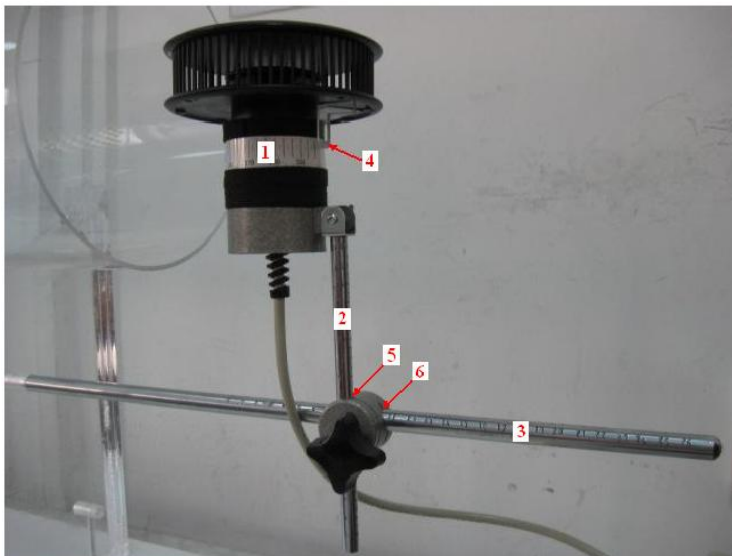
W skład stanowiska laboratoryjnego do badania inteligentnego czujnika wiatru wchodzi:

- Dmuchawa powietrzna 1800 W (1);
- Rura z plexi wraz z krążkami stabilizującymi przepływ powietrza (2);
- Laboratoryjny zasilacz stabilizowany (3);
- Autotransformator 0-250 V (4);
- Inteligentny czujnik wiatru MMW-005 (5);
- Komputer PC z oprogramowaniem LabView (6).

Rura oraz dmuchawa powietrzna wraz z zasilającym ją autotransformatorem stanowią mechanizm symulujący wiatr. Regulacja napięcia zasilania dmuchawy pozwala na płynną regulację prędkości przepływu powietrza. Mocowanie inteligentnego czujnika wiatru pozwala między innymi na obracanie czujnika wokół własnej osi, przez co można zmieniać kierunek wiatru w stosunku do czujnika. Zasilacz stabilizowany doprowadza do czujnika napięcie stałe 12 V. Czujnik połączony jest z komputerem przez szeregowy interfejs RS-232.

Mocowanie czujnika wiatru pozwala poza obracaniem go również na przemieszczanie względem rury w dwóch płaszczyznach (rys. 7). Elementami regulacyjnymi są:

- podziałka kąta obrotu czujnika (1), wskaźnik kąta obrotu (4),
- pręt pionowy z podziałką wysokości (2), wskaźnik wysokości (5),
- pręt poziomy wraz z podziałką odległości (3), wskaźnik odległości (6).



Rys. 7. Regulacja pozycji czujnika [5].

IV. Oprogramowanie pomiarowe

Oprogramowanie współpracujące z inteligentnym czujnikiem wiatru przygotowano w oparciu o środowisko LabVIEW. Program ten pozwala wyświetlić na ekranie aktualną wartość kierunku (w stopniach) oraz siły wiatru (m/s). Dodatkowo, wyświetlany jest przebieg czasowy prędkości wiatru. Wyniki akwizycji danych mogą następnie zostać zapisane do pliku.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Przygotowanie stanowiska i połączeń

- Upewnić się, że zasilacz stabilizowany (12 V) oraz dmuchawa są wyłączone, a autotransformator jest ustawiony na 0 V.
- Podłączyć przewód zasilający dmuchawę do autotransformatora, a przewody zasilające czujnik do zasilacza stabilizowanego.
- Podłączyć przewód zasilający transformator do sieci.
- Ustawić włącznik dmuchawy na pozycję „włączony”.
- Uruchomić komputer, a następnie aplikację oprogramowania inteligentnego czujnika wiatru (Wind Sensor).

Ad 2. Rejestracja charakterystyki prędkości powietrza w funkcji napięcia zasilania dmuchawy

- Ustawić czujnik w pozycji 1 w podziałce poziomej i w pozycji 8 na podziałce pionowej.
- Uruchomić aplikację Wind Sensor i rozpocząć pomiar przyciskiem RUN.
- Wykonać serię pomiarów prędkości przepływu powietrza w zależności od napięcia zasilania dmuchawy powietrznej (autotransformator). Wyniki zebrać w tabeli, a na jej podstawie przygotować wykres.

Ad 3. Wyznaczenie charakterystyki mierzonego kierunku przepływu powietrza w funkcji kąta obrotu czujnika

- Ustawić czujnik w pozycji 21 na podziałce poziomej i w pozycji 8 na podziałce pionowej.
- Napięcie transformatora ustawić na 100 V.
- Dokonać korekty ustawienia układu czujnika z obudową i prętem pionowym tak, aby wynik pomiaru kierunku przepływu powietrza dla pozycji zero wynosił zero.
- Wykonać serię pomiarów przepływu powietrza dla różnych kątów obrotu czujnika. Wyniki wskazań wraz z błędami zebrać w tabeli, a na jej podstawie przygotować wykres.

Ad 4. Wyznaczenie charakterystyki przekroju strumienia powietrza

- Ustawić czujnik w pozycji 7 na podziałce poziomej i w pozycji 0 na podziałce pionowej.
- Ustawić autotransformator na napięciu 100V.
- Wykonać serię pomiarów prędkości przepływu powietrza w zależności od miejsca ustawienia czujnika (położenie w osi pionowej i odległość od krawędzi rury). Pomiary należy wykonać dla trzech punktów w osi poziomej oraz co najmniej 10 w osi pionowej. Należy przyjąć, że ustawienia w osi poziomej równe 7, 16, 25 reprezentują odpowiednio 0 cm, 9 cm, 18 cm odległości od krawędzi rury. Wyniki należy zebrać w tabelce, a następnie przygotować wykres.

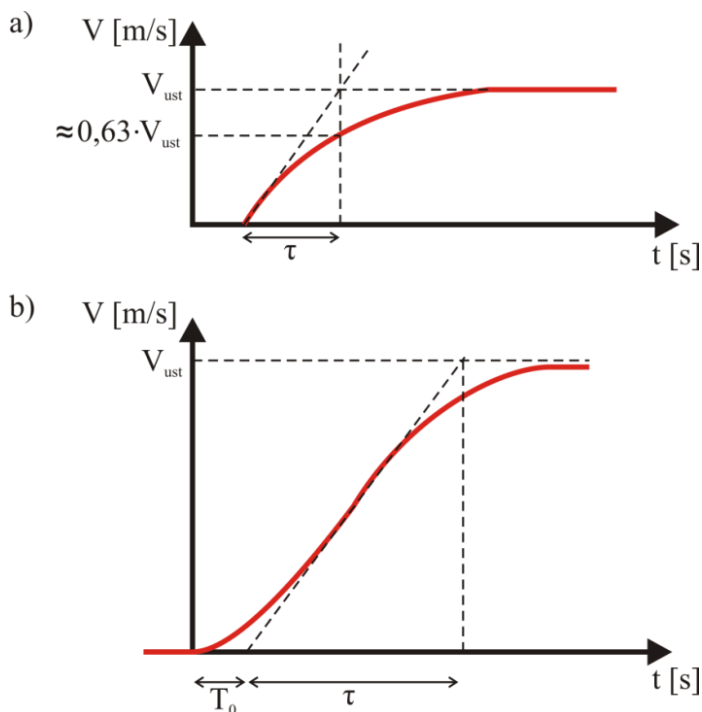
Ad 5. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej czujnika

- Ustawić czujnik w pozycji 13 na podziałce poziomej i w pozycji 8 na podziałce pionowej.
- Napięcie autotransformatora ustawić na 150 V.
- Zasłonić strumień powietrza wypływającego z rury prostokątną płytą.
- Uruchomić aplikację Wind Sensor przyciskiem RUN.
- Gwałtownie wyciągnąć płytę odsłaniając czujnik.

- Po osiągnięciu wartości ustalonej należy zatrzymać pomiar przyciskiem STOP.
- Należy przygotować wykres przebiegu czasowego odpowiedzi skokowej czujnika, oszacować stałą czasową (jeśli układ wykaże cechy odpowiedzi obiektu inercyjnego I rzędu) lub stałą czasową i czas opóźnienia (w przypadku odpowiedzi obiektu inercyjnego II rzędu) (rys. 8).

Ad 6. Wyznaczenie odpowiedzi skokowej układu czujnik - dmuchawa

- Ustawić czujnik w pozycji 1 na podziałce poziomej i w pozycji 8 na podziałce pionowej.
- Napięcie autotransformatora ustawić na 150 V.
- Uruchomić pomiar przyciskiem RUN i wyłączyć dmuchawę.
- Po osiągnięciu stanu ustalonego zatrzymać pomiar przyciskiem STOP.
- Należy przygotować wykres przebiegu czasowego odpowiedzi skokowej układu, oszacować stałą czasową (jeśli układ wykaże cechy odpowiedzi obiektu inercyjnego I rzędu) lub dwie stałe czasowe (w przypadku odpowiedzi obiektu inercyjnego II rzędu) (rys. 8).



Rys. 8. Aproxymacja graficzna parametrów odpowiedzi skokowej obiektu inercyjnego I rzędu (a) i II rzędu (b).

Wykaz aparatury

1. Dmuchawa powietrzna 1800W,
2. Rura z plexi wraz z krążkami stabilizującymi przepływ powietrza,
3. Laboratoryjny zasilacz stabilizowany,
4. Autotransformator 0-250V,
5. Inteligentny Czujnik Wiatru MMW-005,
6. Komputer PC z oprogramowaniem LabVIEW.

**WIRTUALNE SYSTEMY
KONTROLNO-POMIAROWE**

**opracował
dr inż. Piotr Maj**

Ćwiczenie 1

Akwizycja danych pomiarowych

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się z możliwościami konfiguracji karty pomiarowej w systemie operacyjnym.
2. Konfiguracja karty pomiarowej w dedykowanym programie Measurement & Automation Explorer
 - a) Sprawdzenie poprawności działania karty.
 - b) Konfiguracja wątku pomiaru sygnału analogowego.
3. Programowa obsługa karty pomiarowej w środowisku LabVIEW.
 - a) Konfiguracja wątku obsługi karty pomiarowej przy pomocy „DAQ Assistant”.
 - b) Samodzielna konfiguracja wątku obsługi karty pomiarowej z użyciem funkcji sterownika NI DAQmx.
 - c) Konfiguracja dwóch niezależnych wątków ciągłego generowania i akwizycji sygnałów.
 - d) Pomiar sygnału z czujnika.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW, budowa i zasada działania wielofunkcyjnych kart pomiarowych.

Literatura

- [1] B. Mihura. *LabVIEW for Data Acquisition*. Prentice Hall, 2001.
- [2] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, 2002.
- [3] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

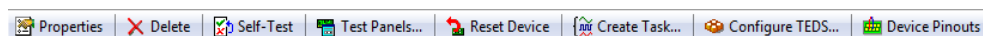
Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się z możliwościami konfiguracji karty pomiarowej w systemie operacyjnym

Karty pomiarowe są urządzeniami pozwalającymi na bardzo szybkie przeniesienie danych pomiarowych do komputera PC. Oprócz odpowiednich układów wejścia / wyjścia na

karcie pomiarowej znajduje się moduł konfiguracji i komunikacji, pozwalający programowo ustawiać pewne parametry pomiaru, takie jak: wzmacnienie sygnału w torze analogowym czy częstotliwość próbkowania. Liczba i rodzaj parametrów, które można ustalać, zależy od rodzaju karty i bardzo często również ceny (podstawowe, wielofunkcyjne karty pomiarowe kosztują dzisiaj kilkaset złotych, specjalizowane karty - kilkadziesiąt tysięcy). Producenci kart razem z urządzeniem dostarczają oprogramowanie pozwalające na sprawdzenie podstawowych funkcji urządzenia, jak również efektu jego działania. Dla urządzeń firmy National Instruments takim programem jest *Measurement & Automation Explorer (MAX)*, stosowany nie tylko w odniesieniu do kart pomiarowych, ale również do konfiguracji urządzeń pracujących w systemie czasu rzeczywistego, układów FPGA, kamer i innych.

W komputerze znajdującym się na stanowisku laboratoryjnym znajduje się wielofunkcyjna karta pomiarowa. Rozpoczynając pracę z takim urządzeniem należy sprawdzić poprawność instalacji karty oraz działanie jej podstawowych funkcji. W tym celu należy uruchomić wspomniany wyżej program *MAX* i w menu *Devices and Interfaces* należy wybrać odpowiednie urządzenie wskazane przez prowadzącego. Dla urządzenia pokazane zostanie odpowiednie menu podobne do przedstawionego na rysunku 1 (dostępne również w menu kontekstowym).



Rys. 1. Menu konfiguracji karty pomiarowej.

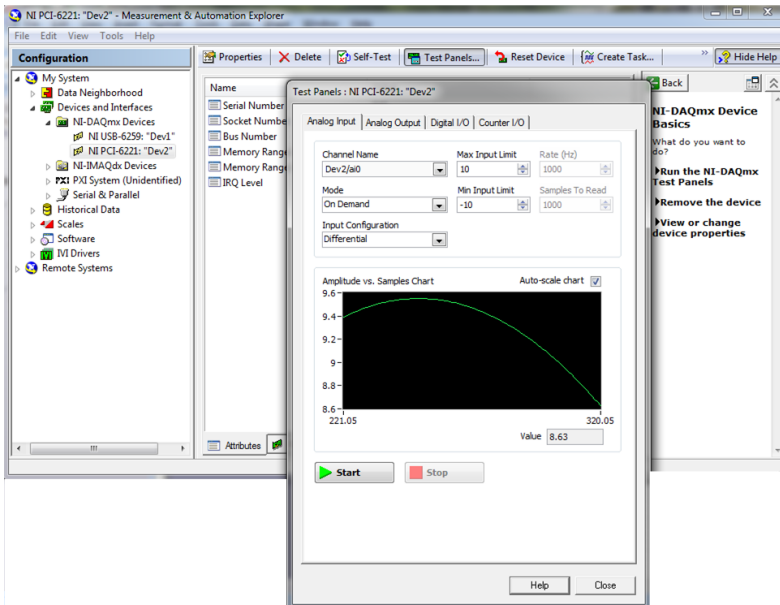
Podobne narzędzia są dostarczane przez innych producentów modułowych urządzeń pomiarowych, takich jak Advantech czy Ad Link i inni. Niniejsze ćwiczenie zostanie przeprowadzone dla urządzenia firmy National Instruments, w przypadku innych programów konfiguracyjnych jest to bardzo podobny proces.

Ad 2a. Sprawdzenie poprawności działania karty

W uruchomionym programie *MAX* należy wykonać polecenie „*Self-Test*” i po jego bezbłędnym wykonaniu pojawi się informacja o poprawnym wykonaniu testu, czyli udaje się komunikować z urządzeniem przy pomocy systemu operacyjnego. Kolejnym testem będzie otwarcie panelu testowego (*Test Panel*) karty pomiarowej (rys.2). Panel testowy służy do sprawdzenia podstawowych funkcji karty pomiarowej, pozwala na wykonanie akwizycji w trybie ciągłym lub punkt po punkcie, zadawanie lub czytanie sygnałów cyfrowych oraz generowanie sygnału analogowego. Podczas ćwiczenia w oknie panelu należy zaobserwować dwa przebiegi:

- Wyjście napięciowe czujnika temperatury (kanał 0),
- Sygnał z generatora (kanał 1).

Podczas czytania sygnałów należy odpowiednio ustawić tryb pracy karty pomiarowej, zakres oraz konfigurację jej wejścia.



Rys. 2. Okno programu *Measurement & Automation Explorer* z otwartym Panelem Testowym karty pomiarowej.

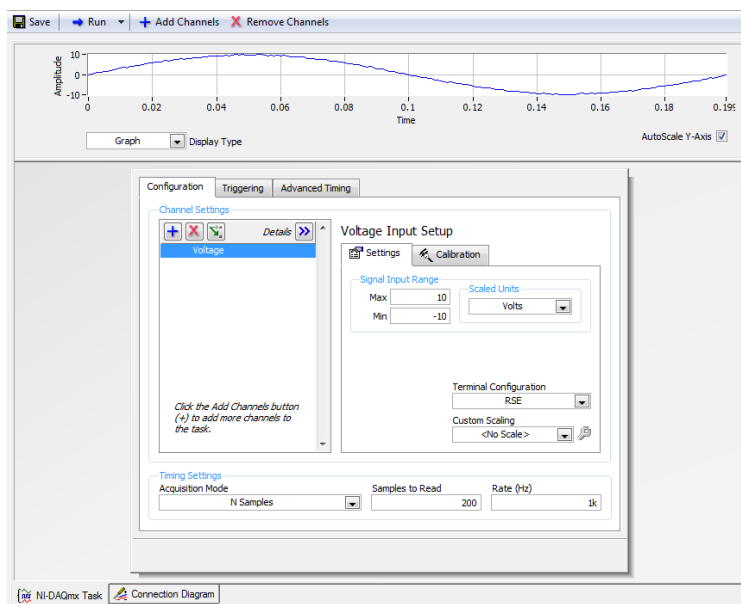
Ad 2b. Konfiguracja wątku pomiaru sygnału analogowego

W uruchomionym programie *MAX* należy wykonać polecenie *Create Task...* i przy pomocy kreatora utworzyć *Task*, czyli zdefiniować zadanie dla karty pomiarowej. Definicja zadania powinna zawierać takie elementy jak: określenie wirtualnego kanału pomiarowego, tryb pomiaru, opcję wyzwalania pomiaru (ang. *trigger*), częstotliwość próbkowania, wskazanie zegara próbkującego. Wirtualny kanał pomiarowy określa kanał fizyczny karty pomiarowej, do którego się odnosi, konfigurację terminala wejściowego, zakres mierzzonego sygnału, kalibrację oraz oznaczenie skali, którą określa funkcja skalująca wraz z oznaczeniem jednostek. Wymienione elementy pokazane na rysunku 3.



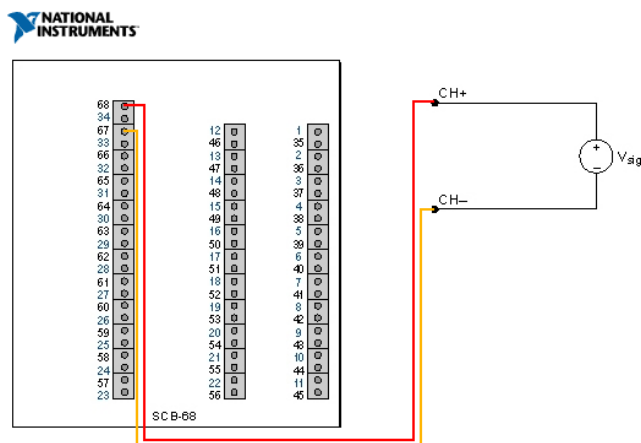
Rys. 3. Definicja zadania (*Task*) dla urządzenia obsługiwanego przez sterownik NI-DAQmx.

Zadanie konfigurowane jest interaktywnie i w tym zakresie nie wymaga pisania kodu programu. Okno konfiguracji pokazane jest na rysunku 4.



Rys. 4. Okno konfiguracji zadania pomiarowego przy użyciu kreatora.

W zakładce *Connection Diagram* widoczny jest sposób podłączenia mierzonych sygnałów. Przykład podłączenia pokazany jest na rysunku 5.



Rys. 5. Automatycznie wygenerowany opis podłączenia mierzonego sygnału do terminala karty pomiarowej.

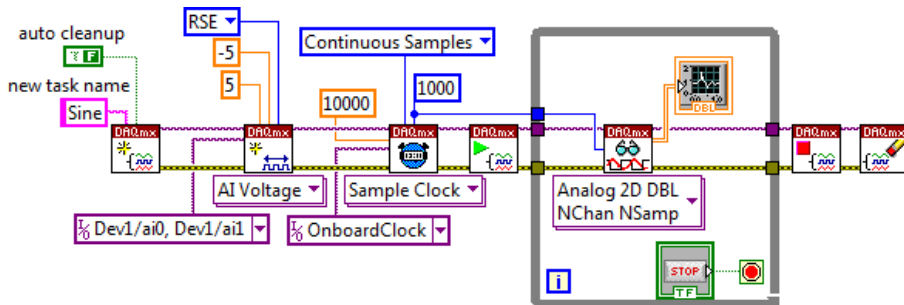
Ad 3a. Konfiguracja wątku obsługi karty pomiarowej przy pomocy „DAQ Assistant”

Do tej pory zadanie pomiarowe było generowane przy użyciu programu nie będącego narzędziem programistycznym. Kolejnym etapem jest napisanie fragmentu kodu, który spełni wskazane zadanie pomiarowe. Najpierw należy uruchomić środowisko *LabVIEW*, następnie w nowym programie położyć na diagramie blokowym funkcję *DAQ Assistant* z palety *Measure I/O >> DAQmx*. Położenie funkcji spowoduje otwarcie kreatora zadania pomiarowego podobnego do kreatora używanego w programie *MAX* (rys. 4). Należy użyć kreatora do wygenerowania zadania akwizycji sygnału analogowego (czujnik temperatury) w trybie ciągłym.

Po odpowiednim skonfigurowaniu zadania i sprawdzeniu, że sygnał jest czytany poprawnie, należy przekształcić wygenerowaną funkcję *DAQ Assistant* na zestaw funkcji sterownika *NI-DAQmx*. Przekształcenia dokonuje się poprzez menu kontekstowe. Należy zapoznać się z użytymi funkcjami, zidentyfikować ich położenie na palecie funkcji w podmenu *DAQmx* i korzystając z pomocy kontekstowej zastanowić się nad kolejnością ich użycia.

Ad 3b. Samodzielna konfiguracja zadania obsługi karty pomiarowej z użyciem funkcji sterownika NI DAQmx

Na podstawie poprzedniego punktu należy samodzielnie zapisać zadanie pomiarowe poprzez odpowiednie użycie funkcji sterownika *NI-DAQmx*. Pomiar sygnału z generatora realizowany ma być w trybie ciągłym. Przykład zadania pokazany jest na rysunku 6.



Rys. 6. Przykład programowej realizacji zadania akwizycji sygnału analogowego.

Ad 3c. Konfiguracja dwóch niezależnych wątków ciągłego generowania i akwizycji sygnałów

Należy równoległe z akwizycją sygnału analogowego (punkt 3b) uruchomić ciągłą generację sygnału na wyjściu analogowym karty pomiarowej. Zadanie generowania sygnału

należy zbudować poprzez skopiowanie istniejącego zadania i podmianę odpowiednich funkcji. Generowany sygnał należy zaobserwować na oscyloskopie.

Ad 3d. Pomiar sygnału z czujnika

Należy zarejestrować wartość sygnału zwracaną przez wskazany przez prowadzącego czujnik (przetwornik) wielkości fizycznej na wielkość elektryczną. Należy odpowiednio zareagować (w programie) na przekroczenie pewnej wartości. Przekroczenie zadanej wartości może być zaznaczone poprzez ustawienie wartości logicznej „1” na wyjściu karty pomiarowej.

Wykaz aparatury

1. Komputer z zainstalowanym środowiskiem LabVIEW i kartą pomiarową,
2. Oscyloskop,
3. Generator.

Ćwiczenie 2

Komunikacja z przyrządami pomiarowymi

Program ćwiczenia

1. Konfiguracja portów RS-232 oraz GPIB w dedykowanym programie *Measurement & Automation Explorer*.
2. Programowa obsługa urządzeń pomiarowych w środowisku LabVIEW:
 - a) Konfiguracja wątku obsługi urządzenia przy pomocy *Instrument Assistant*,
 - b) Samodzielna konfiguracja wątku obsługi urządzenia pomiarowego z użyciem architektury VISA,
 - c) Konfiguracja dwóch niezależnych wątków komunikacji z urządzeniami.
3. Budowa sterownika urządzenia z komunikacją szeregową.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW, protokoły komunikacyjne RS-232, GPIB.

Literatura

- [1] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, 2002.
- [2] R.H. Bishop. *LabVIEW Student Edition*. Prentice Hall.
- [3] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Konfiguracja portów RS-232 oraz GPIB w dedykowanym programie Measurement & Automation Explorer

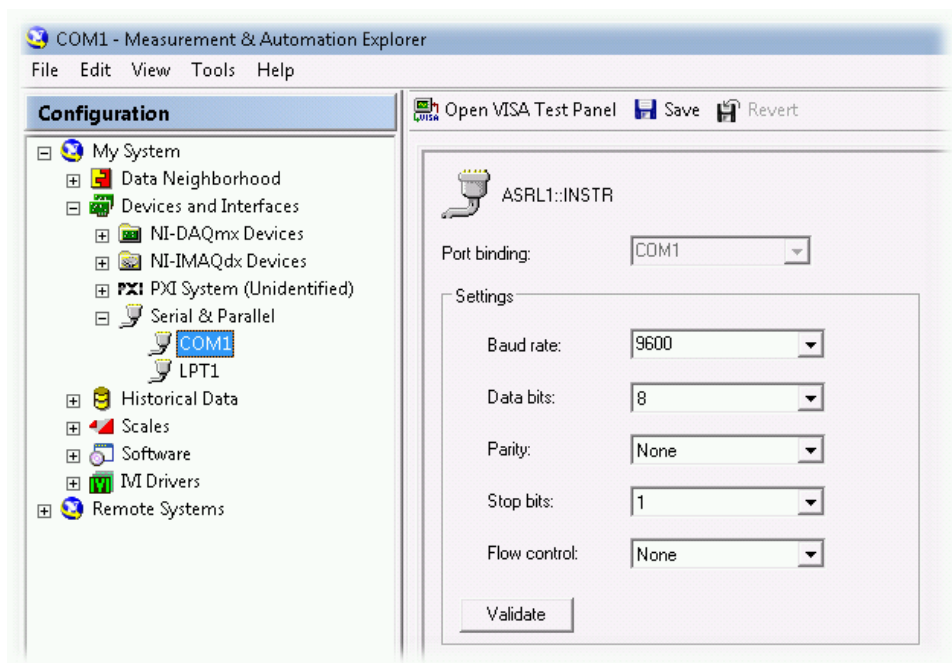
Urządzenia pomiarowe ogólnego przeznaczenia, takie jak multimetry, oscyloskopy i generatory są gotowymi, samodzielnymi urządzeniami, co z kolei jest ich ogromną zaletą – fakt, że można je włączyć i po prostu zacząć używać. Jedną z nielicznych wad tego typu urządzeń jest fakt, że większość użytkowników używa ich manualnie ustawiając wszelkie

parametry. Ręczna obsługa urządzeń powoduje, że automatyzacja pomiarów czy testów jest bardzo czasochłonna.

Istnieje jednak możliwość automatyzacji pomiarów przy użyciu standardowych, popularnych przyrządów pomiarowych, które posiadają możliwość komunikowania się z urządzeniami nadrzędnymi takimi jak np. komputer PC (lub inne). Wówczas urządzenie wyposażone jest w jeden z popularnych portów komunikacyjnych, taki jak *RS232*, *GPIB*, *Ethernet*, *USB*. Niniejsze ćwiczenie pokaże taką możliwość i sposób realizacji komunikacji.

Aby rozpocząć pracę z urządzeniem, należy użyć jednego z wielu programów umożliwiających nawiązanie komunikacji przez jeden z wymienionych wcześniej portów (np. dostępny w systemie MS Windows *Hyper Terminal*). Innym programem może być znany już *Measurement & Automation Explorer (MAX)*.

Należy uruchomić program *MAX*, a następnie w odpowiedniej zakładce wybrać opcję *Serial & Parallel*. Należy zapoznać się z możliwościami konfiguracji odpowiednich portów *RS-232* i *GPIB* oraz z możliwymi do ustawienia portami (patrz rysunek 1).



Rys. 1. Okno konfiguracji portu szeregowego w programie *Measurement & Automation Explorer*.

W uruchomionym programie *MAX* należy otworzyć *VISA Test Panel* – program umożliwiający komunikację z przyrządem podłączonym przez port szeregowy i nawiązać z nim komunikację (jednym z dostępnych na stanowisku). W tym celu należy wysłać do urządzenia jedną z komend opisanych w instrukcji użytkownika urządzenia (np. prośba o identyfikację: „*IDN?\n”) w zakładce *viWrite*. Wysłanie komendy potwierdzone jest przyciskiem *Execute*. Sprawdzenie odpowiedzi dokonuje się w zakładce *viRead* po wciśnięciu przycisku *Execute*.

Ad 2a. Konfiguracja wątku obsługi urządzenia przy pomocy *Instrument Assistant*

Punkt 1 ćwiczenia pokazuje możliwość skomunikowania się z urządzeniem przy pomocy komputera PC. Niezwykle istotne jest sprawdzenie komunikacji zanim rozpocznie się pracę nad programem, gdyż nie wiedząc, czy urządzenie w ogóle odpowiada na zapytania można spędzić bardzo dużo czasu poprawiając kod programu, który był napisany poprawnie już za pierwszym razem.

Po potwierdzeniu możliwości komunikacji można przejść do etapu pisania programu wykorzystującego możliwość zdalnej rejestracji lub generowania sygnałów. W tym celu należy uruchomić środowisko LabVIEW i rozpocząć pracę nad nowym programem (*New VI*). Na palecie funkcji w oknie diagramu należy znaleźć funkcję *Instrument Assistant* i przy jej użyciu skomunikować się z urządzeniem pomiarowym, wskazanym przez prowadzącego. Po odpowiednim skonfigurowaniu funkcji ekspresowej i ustawieniu poszczególnych kroków komunikacji z urządzeniem, należy dokonać konwersji tej funkcji na kod zawierający podstawowe funkcje środowiska LabVIEW.

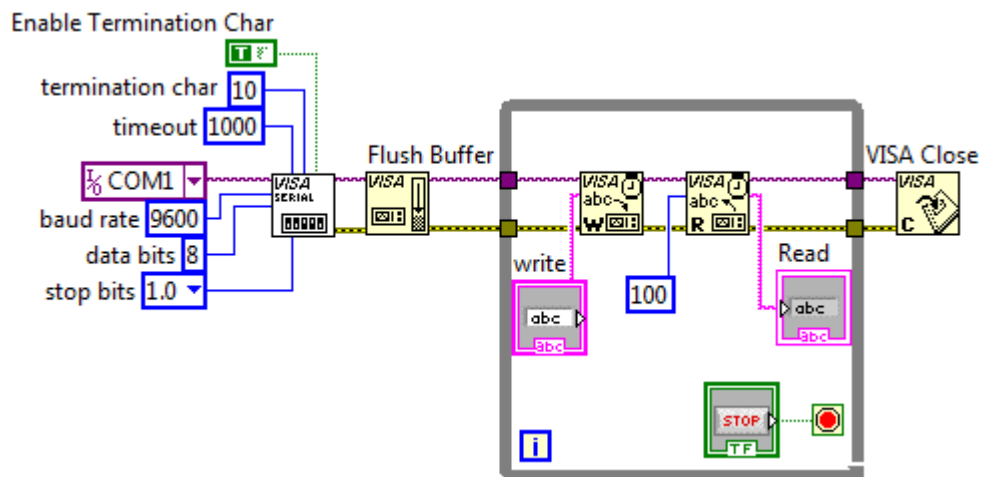
Ad 2b. Samodzielna konfiguracja wątku obsługi urządzenia pomiarowego z użyciem architektury VISA

Należy samodzielnie zbudować program pozwalający na komunikację z urządzeniem pomiarowym przy użyciu funkcji dedykowanych do komunikacji szeregowej (biblioteka *VISA*). Na diagramie należy umieścić odpowiednie funkcje konfiguracji portu, zapisu i odczytu danych oraz zamknięcia portu. Zawsze należy zamykać otwarte referencje. Program należy napisać tak, aby mógł działać autonomicznie (część funkcji powinna być umieszczona w pętli *WHILE*). Przykład programu pokazany jest na rysunku 2.

W przykładowym rozwiązaniu widocznym poniżej, w pętli *WHILE* nie ma funkcji opóźniającej wykonywanie programu. Nie jest to konieczne w tym przypadku, gdyż funkcja *Visa Read* czekając na dane nie pozwala tym samym wykonywać pętli tak szybko jak byłoby to możliwe.

Ad 2c. Konfiguracja dwóch niezależnych wątków komunikacji z urządzeniami

Korzystając z poprzedniego punktu należy zbudować program pozwalający na niezależną komunikację z dwoma urządzeniami pomiarowymi. Na diagramie należy umieścić dwie pętle *WHILE* działające równoległe i umieścić w nich odpowiednie sekwencje funkcji do obsługi portu szeregowego. Należy uruchomić program i sprawdzić poprawność działania. W programach należy zastosować możliwość wysyłania komend jedynie na rozkaz potwierdzony przyciskiem *Send*. W tym celu należy użyć strukturę *CASE*.



Rys. 2. Przykład kodu programu pozwalającego na zapis i odczyt danych z portu szeregowego.

Ad 3. Budowa sterownika urządzenia z komunikacją szeregową

Jednym z bardziej popularnych zastosowań możliwości komunikacji z urządzeniami pomiarowymi jest automatyzowanie pomiarów. Jednak liczba różnych urządzeń i ich funkcji jest tak duża, że trudno byłoby budować automatyczne testy, jeżeli za każdym razem należałoby uczyć się protokołu komunikacji. Na szczęście większość urządzeń używa komend uniwersalnych i zdefiniowanych w protokole SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*). Dodatkowo, wielu producentów dostarcza wraz ze swoim urządzeniem zestaw sterowników pozwalających na szybką implementację programowej obsługi urządzenia (tzw. API – *Application Programming Interface*). Budując jakieś urządzenie, które może komunikować się poprzez jeden z dostępnych interfejsów, należy udostępnić również odpowiednie funkcje API, pozwalające na wygodną i szybką programową obsługę urządzenia. Przykład tego typu funkcji jest instalowany wraz ze środowiskiem – funkcje umieszczone na palcie *Instrument I/O >> Instrument Drivers >> Agilent 34401*.

Aby zbudować podobny zestaw funkcji należy posłużyć się narzędziem pozwalającym na automatyczne wygenerowanie podobnego zestawu funkcji i umieszczeniu ich w odpowiednim miejscu (zachowuje odpowiednią hierarchię).

W celu zbudowania podobnego sterownika należy wybrać z menu opcję *Instrumentation >> Create Instrument Driver Project*. Wówczas interaktywnie przechodzimy przez kolejne etapy generowania funkcji API.

Po wygenerowaniu zestawu funkcji należy przyjrzeć się zbudowanej automatycznie strukturze projektu oraz zaproponowanym funkcjom.

Należy zwrócić uwagę na układ wygenerowanego schematu sterownika na palcie funkcji.

Należy odpowiednio uzupełnić jedną z funkcji, np. odczytu danych i sprawdzić jej działanie.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW i kart GPIB (PCI lub USB),
2. Oscyloskop,
3. Generator.

Ćwiczenie 3

Projekt aplikacji w systemie czasu rzeczywistego

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie ze sposobem instalacji i konfiguracji systemu operacyjnego czasu rzeczywistego,
2. Konfiguracja oprogramowania w systemie czasu rzeczywistego,
3. Konfiguracja projektu aplikacji w systemie czasu rzeczywistego,
4. Aplikacja kontrolno-pomiarowa,
5. Zdalny dostęp do aplikacji pracującej w systemie czasu rzeczywistego.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW, cechy systemu czasu rzeczywistego.

Literatura

- [1] www.ni.com
- [2] R. H. Bishop. *LabVIEW Student Edition*. Prentice Hall.
- [3] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie ze sposobem instalacji i konfiguracji systemu operacyjnego czasu rzeczywistego

System operacyjny czasu rzeczywistego posiada pewne cechy wyróżniające go spośród innych systemów operacyjnych. Jego główną zaletą jest determinizm. Programista piszący aplikację ma możliwość bardzo precyzyjnego kontrolowania wszelkich zależności czasowych występujących w programie.

Nowe terminy pojawiające się przy okazji pisania programów w systemie czasu rzeczywistego to:

Czas wykonania pętli *While* (*Loop Cycle Time*) – jest zależny przede wszystkim od kodu, jaki znajduje się wewnątrz pętli, ale również od procesora, jak też od *schedluler'a* zadań systemu operacyjnego (czyli od samego systemu).

Jitter – jest to wyrażona w jednostkach czasu różnica pomiędzy oczekiwanym, a rzeczywistym czasem wykonania się pętli *While*. W systemach ogólnego przeznaczenia czas wykonania pętli może różnić się nawet o 50 ms. W systemie czasu rzeczywistego *jitter* jest minimalny, a programista może z dużym prawdopodobieństwem określić jego maksymalną wartość.

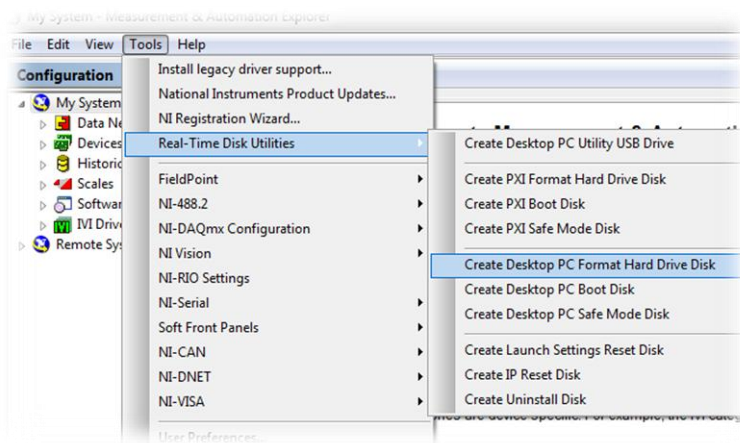
Determinizm – w przypadku systemów operacyjnych oznacza, że możemy zmierzyć wartość *jitter'a*.

Latency – jest czasem potrzebnym na reakcję na zdarzenie lub czasem pomiędzy pobudzeniem, a odpowiedzią systemu.

Podana wyżej terminologia pozwoli lepiej zrozumieć różnice pomiędzy mającymi wiele podobieństw systemami ogólnego przeznaczenia (np. MS Windows, Linux, MacOS), a systemami czasu rzeczywistego.

Dzisiaj system czasu rzeczywistego (*Real Time Operating System – RTOS*) można zainstalować na każdym niemal komputerze. W ćwiczeniu użyty będzie system operacyjny Phar Lap ETS firmy Wind River. Aby zainstalować wspomniany system należy otworzyć program *Measurement and Automation Explorer (MAX)* i następnie w menu *Tools >> Real Time Disk Utilities* utworzyć dyskietkę startową systemu RT (patrz rys. 1).

Przygotowaną dyskietkę należy umieścić w stacji, która jest podłączona do płyty głównej komputera przemysłowego, a następnie wykonać proces instalacji systemu.

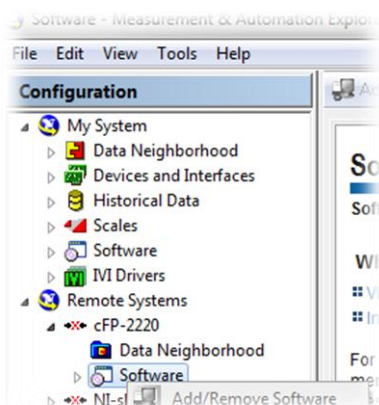


Rys. 1. Budowanie dyskietki startowej systemu Phar Lap ETS.

Ad 2. Konfiguracja oprogramowania w systemie czasu rzeczywistego

Po przeprowadzeniu procesu instalacji, zainstalowany system posiada minimalne komponenty umożliwiające mu komunikację sieciową. Po włączeniu komputera na ekranie informacyjnym podłączonym do wyjścia VGA widoczny jest komunikat o uruchomieniu systemu LabVIEW RT oraz o aktualnych procesach uruchomionych na komputerze. Chcąc

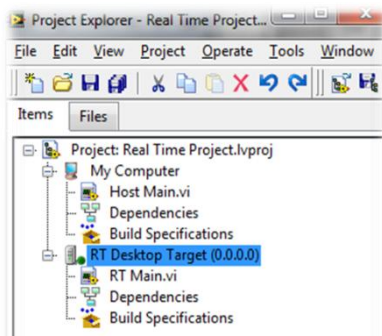
używać dodatkowych komponentów w pisanym oprogramowaniu (np. karty pomiarowe, diagramy stanów, komunikacja szeregową) należy te opcje doinstalować. W tym celu należy znaleźć urządzenie z zainstalowanym systemem czasu rzeczywistego, jako *Remote Device* w programie *MAX*, a następnie w zakładce *Software*, w menu kontekstowym należy wybrać opcję instalacji dodatkowych komponentów (m.in. sterowniki do kart pomiarowych i urządzeń podłączanych przez port szeregowy).



Rys. 2. Instalacja dodatkowych komponentów w systemie Phar Lap ETS.

Ad 3. Konfiguracja projektu aplikacji w systemie czasu rzeczywistego

Po przygotowaniu systemu czasu rzeczywistego i uzupełnieniu go o odpowiednie komponenty należy przygotować środowisko do pracy nad programem. W tym celu należy utworzyć nowy projekt w środowisku LabVIEW. W oknie projektu w menu spod prawego klawisza myszy wywołanego dla samego projektu, należy dodać nowe urządzenie docelowe istniejące w sieci lokalnej, a następnie wybrać opcję *Real-Time Desktop* i wybrać przygotowane wcześniej urządzenie. Następnie w oknie projektu należy utworzyć dwa programy – jeden w menu *My Computer*, drugi w menu *RT Desktop Target*, tak, jak zostało to pokazane na rysunku 3.

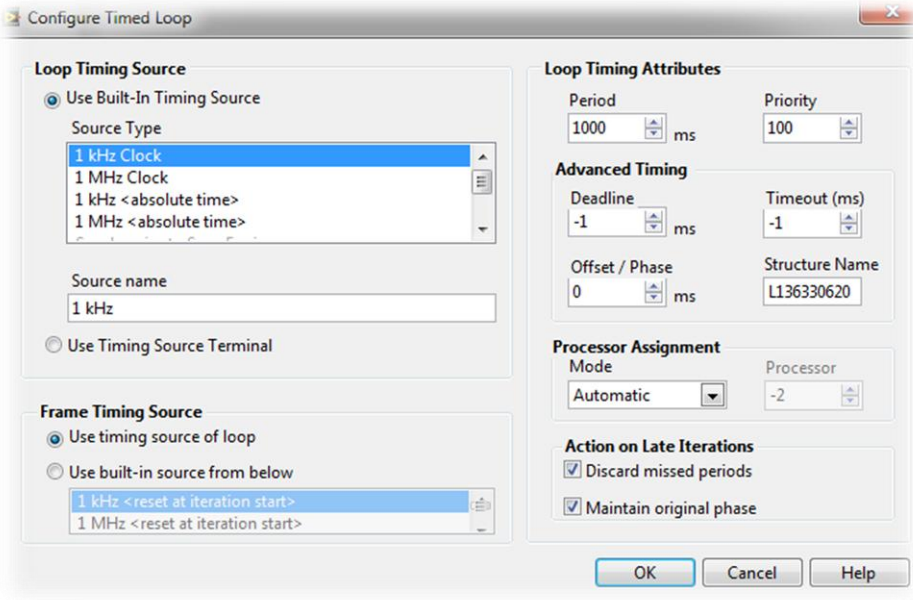


Rys. 3. Okno projektu dla aplikacji pracującej w systemie czasu rzeczywistego.

Budowane w ramach projektu programy będą automatycznie przypisane do odpowiednich systemów pod warunkiem tworzenia ich z menu spod prawego klawisza myszy wywołanego w danym systemie. Fakt ten będzie wskazywany w lewym dolnym rogu okna każdego programu poprzez tekstowy opis nazwy projektu i określenie systemu, na którym pracuje - np. „*Real Time Project.lvproj/My Computer*” lub „*Real Time Project.lvproj/RT Desktop Target*”. Każdy program uruchamiany z opcją RT Desktop Target wymaga odpowiedniego procesu kompilacji i osadzenia w systemie operacyjnym, co trwa przez pewien czas (użytkownik jest każdorazowo informowany o tym procesie).

Ad 4. Aplikacja kontrolno-pomiarowa

Podczas pisania programów uruchamianych w systemie czasu rzeczywistego programista ma do dyspozycji dodatkową paletę funkcji, zawierającą dedykowane i mocno optymalizowane procedury. Dodatkowo, pisząc programy zdeterminowane należy zwrócić uwagę na możliwość używania pętli *Timed Loop*. Jest to pętla umożliwiająca precyzyjną definicję zachowania się pętli *While*. Okno konfiguracji wywołane jest po dwukrotnym kliknięciu terminalu pętli (rysunek 4).



Rys. 4. Okno konfiguracji pętli *Timed Loop*.

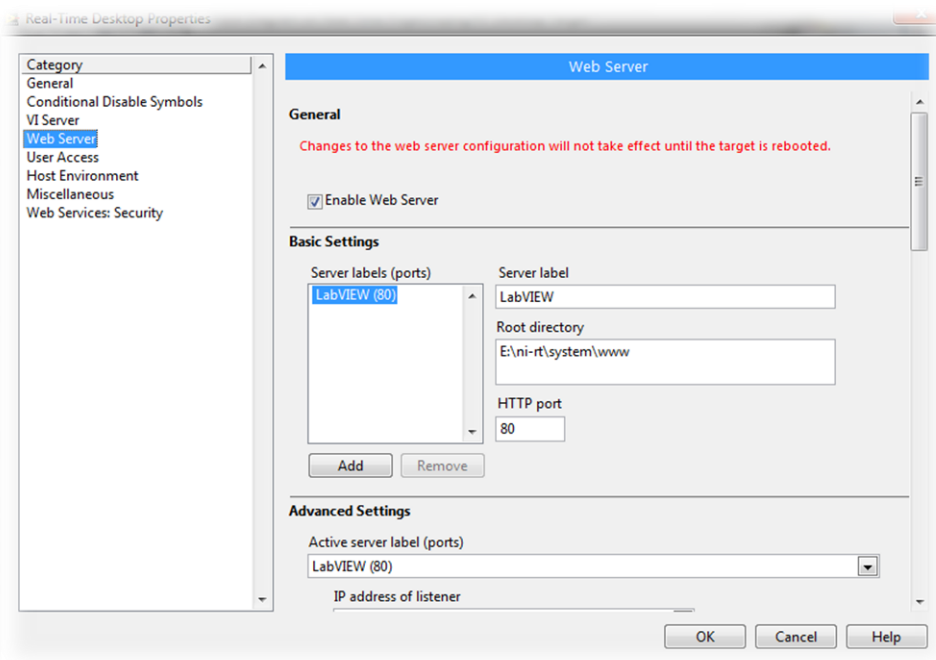
Konfiguracja umożliwia wybór zegara, który dla systemów RT może być zegarem megahercowym (MHz). Dodatkowo można wybrać opcje ustalenia odstępu czasowego pomiędzy kolejnymi iteracjami pętli, priorytet wykonania pętli i procesor, na którym ma się

dana pętla wykonywać. Wszystkie te opcje powodują, iż warte rozważenia jest wykorzystanie tej struktury w pisany programie.

Celem ćwiczenia jest napisanie programu pracującego autonomicznie w systemie czasu rzeczywistego i komunikującego się z systemem nadrzędnym (*hostem*). Program pisany w systemie RT (tzw. *Target*) ma posiadać architekturę wielowątkową (oddzielny wątek pomiarowy i komunikacyjny). Program będzie komunikował się z programem pracującym na komputerze programisty (pod systemem MS Windows).

Program ma dokonywać pomiaru temperatury w trybie ciągłym i reagować na przekroczenie wartości maksymalnej i minimalnej poprzez odpowiednie wystawienie jednego z wyjść cyfrowych karty pomiarowej. Przykład programu obsługującego kartę pomiarową zawarty jest w ćwiczeniu 1. Wartość temperatury oraz alarmy informujące o przekroczeniu wartości mają być wysłane do systemu nadrzędnego, który z kolei zadaje wspomniane limity temperatury. Program ma działać automatycznie po włączeniu komputera.

Odpowiednie opcje budowania pliku wykonywalnego znajdują się w menu kontekstowym w oknie projektu w menu *Build Specification*.



Rys. 5. Okno konfiguracji serwera http.

Ad 5. Zdalny dostęp do aplikacji pracującej w systemie czasu rzeczywistego

W oknie projektu w menu kontekstowym należy wybrać opcję *Properties* dla systemu RT, a następnie przejść do zakładki *Web Server*. Pozwala ona na konfigurację serwera http, który z kolei pozwala na dostęp do budowanej aplikacji poprzez okno przeglądarki internetowej. W oknie konfiguracji (rys. 5) należy wybrać opcję *Enable Web Server* oraz umożliwić podłączenie do serwera wszystkim adresom IP

Następnie przy użyciu narzędzia *Web Publishing Tool* (z menu *Tools*) należy zbudować stronę internetową, na której umieszczony zostanie panel frontowy zbudowanego programu. Należy umieścić zbudowaną stronę w odpowiednim katalogu (wskazanym przez kreatora strony), a następnie sprawdzić działanie systemu.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. Płyta komputera przemysłowego Advantech,
3. Karta pomiarowa NI PCI 6221
4. Oscyloskop,
5. Generator.

Ćwiczenie 4

Wykorzystanie układu FPGA w aplikacji kontrolno-pomiarowej

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze sposobem konfiguracji układu FPGA, pracującego pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego,
2. Konfiguracja projektu aplikacji wykorzystującej układ FPGA,
3. Aplikacja kontrolno-pomiarowa.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW, zasada działania układów FPGA.

Literatura

- [1] www.ni.com
- [2] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, 2002.
- [3] R. H. Bishop. *LabVIEW Student Edition*. Prentice Hall.
- [4] J. Majewski, P. Zbysiński. *Układy FPGA w przykładach*. BTC, 2007.
- [5] J. Pasierbiński, P. Zbysiński. *Układy Programowalne w praktyce*. WKiŁ, 2002.
- [6] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się ze sposobem konfiguracji układu FPGA pracującego pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego

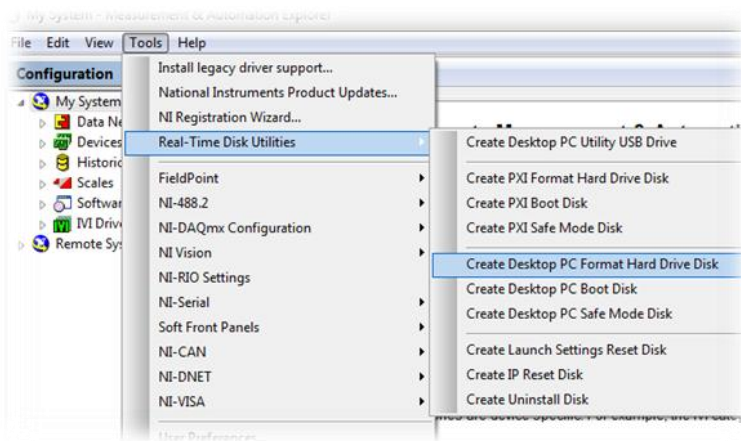
Układ Programowalnych Bramek Logicznych (ang. *Field Programmable Gate Array* – *FPGA*) jest układem scalonym, w którym bramki logiczne nie są połączone ze sobą, nie posiadają zdefiniowanej logiki. Układy FPGA używane są głównie w urządzeniach elektronicznych produkowanych w małych lub średnich ilościach, gdyż w przypadku bardzo dużej liczby urządzeń opłaca się wyprodukować specjalizowany układ scalony *ASIC* (Ap-

application Specific Integrated Circuit). Układy FPGA programuje się głównie w językach opisu sprzętu (*ang. Hardware Description Language*), takich jak VHDL lub Verilog. Firma National Instruments dała możliwość programowania układów FPGA w środowisku LabVIEW, czyli języku wysokiego poziomu, z którego można korzystać bez konieczności nauki języków opisu sprzętu.

Typowe dla układów FPGA aplikacje to:

- inteligentna akwizycja danych pomiarowych,
- bardzo szybkie zadania sterowania,
- przetwarzanie danych na poziomie czujnika,
- obciążenie procesora w krytycznych obliczeniowo zadaniach.

Podczas zajęć używany będzie układ FPGA zamontowany na module *sbRIO* (*single board Reconfigurable Input Output*) firmy National Instruments. Komputer programisty (*host*) łączy się, poprzez kabel Ethernetowy, z zainstalowanym na module *sbRIO* procesorem *Power PC*, na którym zainstalowany jest system czasu rzeczywistego. Procesor komunikuje się dalej z układem FPGA.



Rys. 1. Konfiguracja modułu sbRIO.

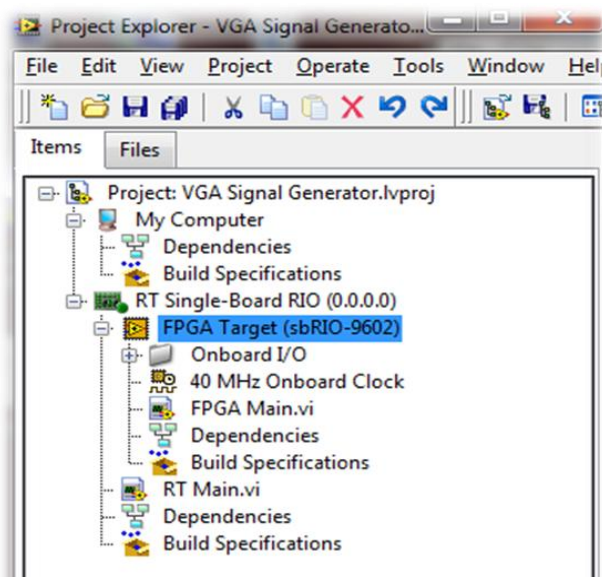
Podobnie jak w przypadku większości produktów firmy National Instruments pierwsze uruchomienie, sprawdzenie i konfiguracja urządzenia dokonywana jest przy użyciu programu *Measurement and Automation Explorer (MAX)*. Należy uruchomić program MAX i nawiązać połączenie z modułem *sbRIO*, zawierającym układ FPGA.

Urządzenie powinno zostać wykryte automatycznie, jako *Remote Device*. Należy sprawdzić konfigurację modułu, zainstalować najnowszą wersję oprogramowania modułu *sbRIO* korzystając z menu kontekstowego, w pozycji *software* (patrz rys. 1).

Ad 2. Konfiguracja projektu aplikacji wykorzystującej układ FPGA

Po sprawdzeniu poprawności działania i zainstalowaniu niezbędnych komponentów na systemie *sbRIO* należy przygotować środowisko do pracy nad programem. W tym celu należy utworzyć środowisko LabVIEW i dalej nowy projekt. Pokazane zostanie okno projektu, niewypełnione żadnymi elementami. Projekt należy zapisać w katalogu użytkownika, jako *VGA Signal Generator.lvproj*. Następnie należy wywołać menu spod prawego klawi-

sza myszy dla elementu *Project* i wybrać opcję *New >> Targets and Devices*. W wywołanym oknie dialogowym należy wybrać opcję *Real-Time Single-Board RIO* i wybrać używany model – 9602. W oknie projektu zostanie dodane urządzenie o odpowiednim adresie IP. Na liście projektu należy rozwinąć menu *RT Single – Board RIO* i zwrócić uwagę, że dodany jest automatycznie układ *FPGA*, jako oddzielne urządzenie – patrz rysunek 2.



Rys. 2. Okno projektu przygotowane dla modułu *sbRIO 9602*.

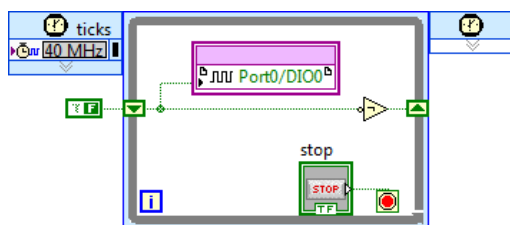
W menu kontekstowym dla *RT Single – Board RIO* należy wybrać opcję *NEW >> VI* i zbudowany, pusty program zapisać jako *RT Main*. Operację należy powtórzyć wywołując menu spod prawego klawisza myszy dla *FPGA Target*, a stworzony program zapisać jako *FPGA Main*. Po wykonaniu wymienionych kroków okno projektu powinno wyglądać jak na rysunku 2. W ćwiczeniu używamy trzech poziomów zagnieżdżenia systemów. Masterem jest przeważnie komputer z interfejsem użytkownika. Można również rozróżnić, który z komputerów jest *hostem*, a który *targetem*. Targetem jest urządzenie podrzędne, czyli będzie nim *FPGA* dla systemu *RT*, oraz *RT* dla systemu *Windows*.

Ad 3. Aplikacja kontrolno-pomiarowa

Celem ćwiczenia jest napisanie programu pracującego autonomicznie w układzie *FPGA* i komunikującego się z systemem nadrzędnym (*hostem*, czyli systemem czasu rzeczywistego). Program ma generować sygnał wideo według dostępnej specyfikacji. Efektem działania programu powinno być narysowanie pewnego kształtu (np. koło lub prostokąt), który można modyfikować (kształt, pozycja, kolor, etc.) z poziomu systemu czasu rzeczywistego. Program ma działać automatycznie po podłączeniu zasilania do modułu *sbRIO*.

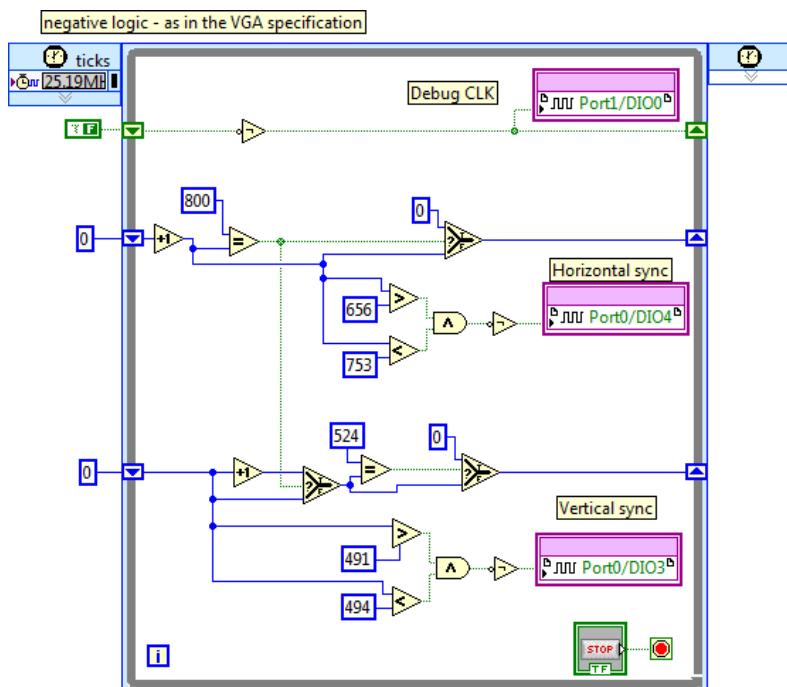
Realizacja powinna składać się z następujących kroków, kolejno ocenianych przez prowadzącego:

1. Generowanie sygnału prostokątnego (zegara) o częstotliwości 20 MHz na wyjściu układu FPGA (potwierdzenie poprzez pomiar z oscyloskopem). Przykład realizacji pokazany jest na rysunku 3.



Rys. 3. Przykład realizacji generowania funkcji zegara na wyjście P0/DIO0 z częstotliwością 20 MHz.

2. Generowanie dwóch linii synchronizacyjnych (synchronizacji poziomej i pionowej) o zadanej częstotliwości i wypełnieniu zgodnym ze specyfikacją dla danej wielkości obrazu. Podpowiedzi dotyczące liczby odpowiednich bitów zestawione są w tabeli 1.



Rys. 4. Implementacja liczników i generowanie impulsów synchronizacyjnych sygnału wideo.

Tabela 1. Parametry sygnału VGA.

Picture Format	Pixel Clock [MHz]	Horizontal [pixels]				Vertical [lines]			
		Active Video	Front Porch	Sync Pulse	Back Porch	Active Video	Front Porch	Sync Pulse	Back Porch
640x480	25.175	640	16	96	48	480	11	2	31

Wygenerowanie sygnałów powinno być zrealizowane poprzez budowę dwóch liczników wskazujących na aktualną pozycję plamki w prostokątnym układzie współrzędnych. Częściowa realizacja pokazana jest na rysunku 4, należy ją uzupełnić o moduł wyświetlania kształtu w zależności od wartości liczników.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. System NI sbRIO 9602,
3. Oscyloskop,
4. Generator.

Ćwiczenie 5

Wykorzystanie mobilnego urządzenia PDA dla aplikacji kontrolno-pomiarowych

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze sposobem komunikacji urządzeń mobilnych z komputerem typu desktop PC lub laptop,
2. Konfiguracja projektu aplikacji wykorzystującej urządzenie PDA,
3. Aplikacja kontrolno-pomiarowa.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW,

Literatura

- [1] Peter A. Blume. *The LabVIEW Style Book*. Prentice Hall, 2007.
- [2] R. H. Bishop. *LabVIEW Student Edition*. Prentice Hall.
- [3] J. Travis. *LabVIEW for Everyone*. Prentice Hall, 2001.
- [4] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się ze sposobem komunikacji urządzeń mobilnych z komputerem typu desktop PC lub laptop

Urządzenia mobilne są coraz ogólniej dostępne i coraz częściej stosowane ze względu na dużą wygodę ich używania. Coraz częściej też urządzenia *PDA (Personal Digital Assistant)*, zwane również *Palmtopami*, posiadają wbudowaną funkcję telefonu, lub też – są to telefony z zainstalowanym systemem *MS Windows Mobile* lub *MS Windows CE*. Programy mające działać na takich urządzeniach posiadają pewne zalety i wady, które należy poznać, aby móc w przyszłości podjąć odpowiednią decyzję o ich stosowaniu bądź niestosowaniu.

Dostępne na stanowisku urządzenie PDA firmy HP posiada zainstalowany system operacyjny *MS Windows Mobile*. Takie urządzenie łączy się z komputerem nadrzędnym przy pomocy kabla USB lub bezprzewodowego łącza *Bluetooth*. Program umożliwiający

konfigurację urządzenia mobilnego nazywa się *MS Active Sync*. Oprócz wykonywania synchronizacji obu podłączonych urządzeń i obsługi plików, program pozwala również na instalowanie oprogramowania.

Należy podłączyć urządzenie do komputera poprzez złącze USB. Automatycznie powinno zostać nawiązane połączenie pomiędzy systemem Windows, a urządzeniem mobilnym. Należy sprawdzić dostępne funkcje synchronizacji i podglądu plików. Należy mieć pewność, że urządzenie jest widziane przez komputer programisty, gdyż w przeciwnym razie umieszczenie w urządzeniu napisanego programu nie powiedzie się.

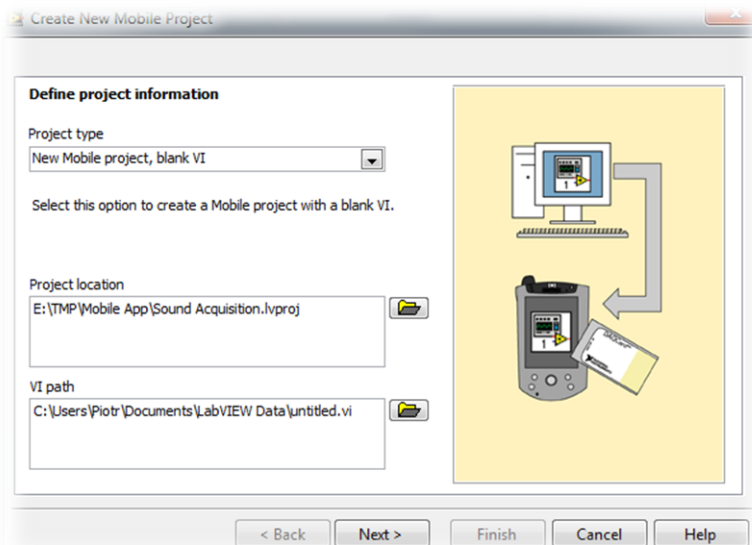
Ad 2. Konfiguracja projektu aplikacji wykorzystującej urządzenie PDA

Po skomunikowaniu urządzenia z komputerem programisty należy przygotować środowisko do pracy nad programem. W tym celu należy uruchomić środowisko LabVIEW i w nim utworzyć nowy projekt. W niniejszym ćwiczeniu należy skorzystać z konfiguratora projektu. W głównym oknie środowiska LabVIEW należy w zakładce *Targets* wybrać opcję *Mobile Project* i wcisnąć przycisk *Go*.



Rys. 1. Należy wybrać Mobile Project.

W kolejnym oknie należy uzupełnić odpowiednie pola mówiące o ścieżkach dostępu do katalogu projektu i nazwie samego projektu (rys. 2). Po wypełnieniu odpowiednich pól należy wcisnąć *Next*.



Rys. 2. Okno konfiguracji projektu dla aplikacji mobilnej.

Ćw. 5 – Wykorzystanie mobilnego urządzenia PDA dla aplikacji kontrolno-pomiarowych

W kolejnym oknie należy wybrać odpowiednią wersję systemu operacyjnego zainstalowanego na urządzeniu oraz domyślną orientację programu (*Mobile Portrait Screen* – ekran pionowy, *Mobile Landscape Screen* – ekran poziomy). Należy ponownie wcisnąć przycisk *Next* i w ostatnim oknie konfiguratora zaznaczyć opcję *Build Specification*. Spowoduje to otwarcie kolejnego okna właściwości budowanego programu wykonywalnego.

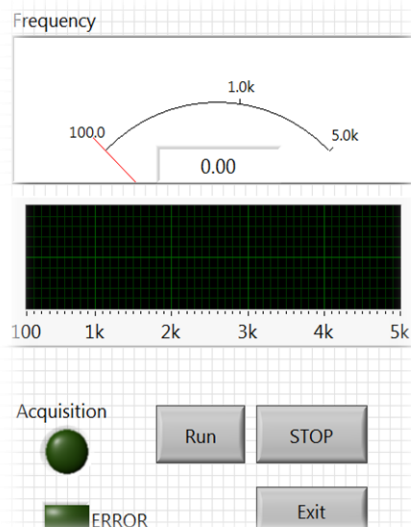
W oknie właściwości należy określić:

- nazwę specyfikacji,
- ścieżkę pliku *exe* na komputerze programisty oraz w urządzeniu mobilnym,
- skalę panelu frontowego = 2,
- głębię ekranu = 8.

Wybrane opcje należy potwierdzić wciskając OK. Otwarty zostaje panel frontowy programu taki, jaki będzie widoczny na urządzeniu mobilnym. Otwartego panelu nie należy modyfikować pod względem rozmiaru, gdyż nie będzie dopasowany do ekranu, na którym ma być wyświetlony. W oknie diagramu blokowego wpisany jest kod programu do dalszego wypełnienia (tzw. *Template*). Po wykonaniu powyższych czynności projekt jest przygotowany i gotowy do dalszej ewaluacji.

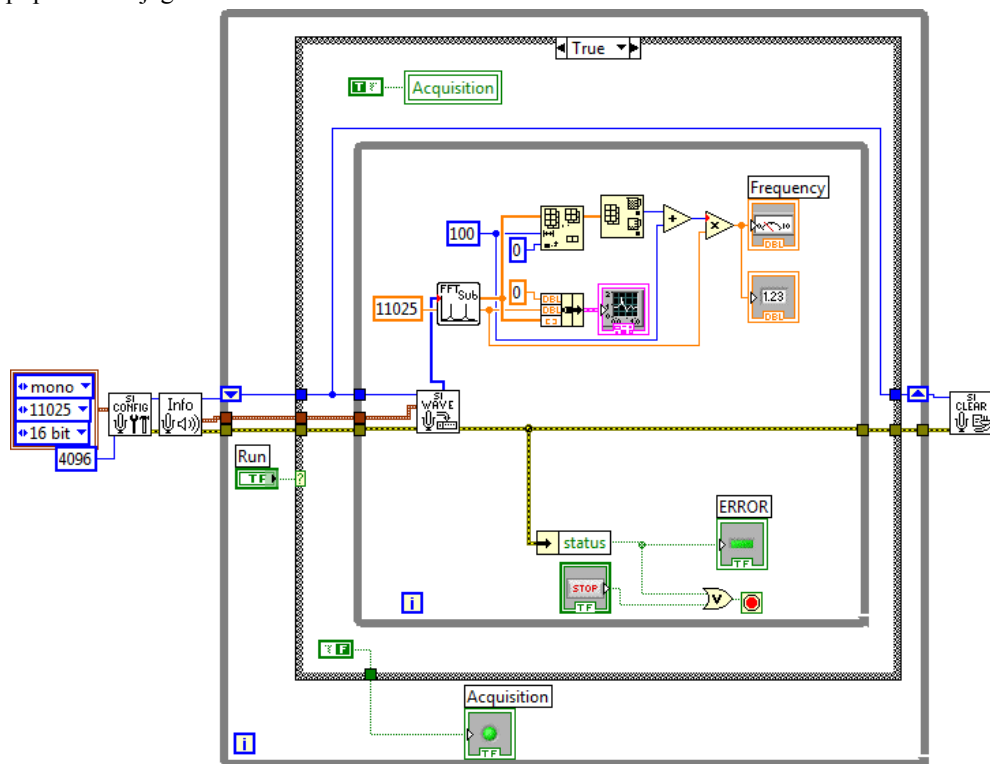
Ad 3. Aplikacja kontrolno-pomiarowa

Pierwszym zadaniem do zrealizowania jest napisanie programu pracującego autonomicznie w urządzeniu mobilnym. Budowana aplikacja pomiarowa powinna dokonywać akwizycji sygnału i wyznaczać jego częstotliwość. W tym celu należy napisać program, którego interfejs pokazany jest na rysunku 3.



Rys. 3. Interfejs użytkownika programu.

Po wciśnięciu przycisku *Run* program rozpoczyna akwizycję, zapala się lampka *Acquisition*. Na wykresie pokazane zostaje przeliczone widmo Fouriera, natomiast na indykatorze wskazówkowym pokazana zostaje częstotliwość najwyższego prążka widma. Wciśnięcie przycisku *Stop* powoduje zatrzymanie akwizycji i zgaszenie odpowiedniej lampki, natomiast wciśnięcie przycisku *Exit* powoduje zamknięcie programu (jeżeli akwizycja jest wyłączona). Dodatkowo indykowany jest stan błędu zapaleniem lampki *ERROR* na kolor czerwony. Takie przygotowanie aplikacji pozwala stwierdzić, czy program pozwala na akwizycję próbek. Jeżeli wchodzi do stanu akwizycji, powinien pokazać się wykres lub stan błędu. Należy uzyskać widmo amplitudowe. Kod programu realizujący opisaną funkcjonalność pokazany jest na rysunku 4. Program należy zapisać, uruchomić i sprawdzić poprawność jego działania.



Rys. 4. Kod programu dokonujący akwizycji oraz przeliczenia częstotliwości sygnału.

Programy pisane na urządzenia mobilne posiadają bardzo ubogie możliwości debugowania, dlatego przy ich pisaniu należy wykonywać drobne kroki, za każdym razem sprawdzając efekt drobnych zmian, a wszelkie możliwe błędy należy pokazywać na interfejsie użytkownika. Jeżeli pewne elementy nie mieszczą się na małym interfejsie, należy użyć kontrolkę typu *Tab*.

Kolejnym punktem jest budowa programu, który przekształci urządzenie mobilne w narzędzie do badania słuchu. W związku z tym powinno ono generować ciągły sygnał akustyczny o zmiennej amplitudzie i częstotliwości. Po wciśnięciu przycisku start program

Ćw. 5 – Wykorzystanie mobilnego urządzenia PDA dla aplikacji kontrolno-pomiarowych

rozpoczyna generację sygnału i reaguje odpowiednio na wciśnięcie przez użytkownika przycisku „Słyszę” lub „Nie słyszę”. Zakres częstotliwości generowanego sygnału to od 5 Hz do 22 050 Hz. Amplituda sygnału zmienia się od 1 do 100 %. Efektem działania programu powinno być wyrysowanie na interfejsie użytkownika odpowiedniego wykresu pokazującego granicę słyszalności.

W celu realizacji programu należy zaimplementować strukturę maszyny stanów (zdefiniować odpowiednią kontrolkę typu *Enum*) i odpowiednio reagować na zmiany interfejsu użytkownika.

Wykaz aparatury

1. Komputer z zainstalowanym środowiskiem LabVIEW i kartą pomiarową,
2. Urządzenie mobilne PDA HPQ 214,
3. Oscyloskop,
4. Generator.

Ćwiczenie 6

Wykorzystanie procesora sygnałowego dla aplikacji kontrolno-pomiarowych¹

Program ćwiczenia

1. Zestaw ewaluacyjny BF-537,
2. Konfiguracja modułu BF-537,
3. Obsługa wyjścia analogowego,
4. Implementacja maszyny stanów,
5. Obsługa analogowego wejścia.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku LabVIEW, procesory DSP.

Literatura

- [1] www.ni.com
- [2] R. H. Bishop. *LabVIEW Student Edition*. Prentice Hall.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. *Digital Signal Processing*.
- [4] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zestaw ewaluacyjny BF-537

Urządzenie, które będzie wykorzystywane w programie to moduł ewaluacyjny BF537 z procesorem sygnałowym Black Fin firmy Analog Devices. Nie jest to urządzenie firmy National Instruments, dlatego nie należy uruchamiać programu *Measurement and Automation Explorer*, w celu jego konfiguracji i sprawdzenia poprawności działania.

Mimo, że jest to urządzenie innej firmy, środowisko LabVIEW daje możliwość programowania procesorów sygnałowych poprzez zainstalowanie dodatkowego modułu LabVIEW DSP for Black Fin.

¹ W instrukcji wykorzystano materiały opracowane przez Przemysława Kowalskiego oraz Rafała Kulkę z MSIB, AGH

Podczas ćwiczenia należy wykonać szereg programów ukazujących metodę programowania procesorów sygnałowych w środowisku LabVIEW.

Ad 2. Konfiguracja modułu BF-537

Należy podłączyć moduł BF-537 do komputera PC przy użyciu kabla Ethernetowego i kabla USB, a następnie uruchomić program *Visual DSP++ Configurator*. Należy wykonać test platformy i upewnić się, że test wykonany jest bezbłędnie. Ewentualne błędy uniemożliwią programowanie platformy ze środowiska LabVIEW.

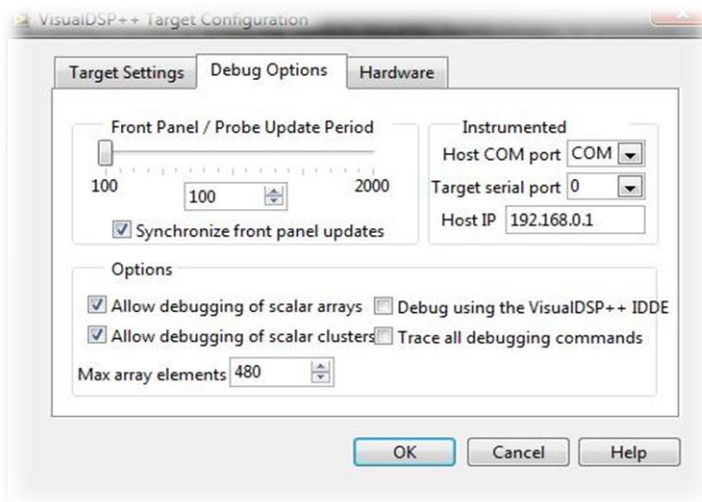
Po przygotowaniu i sprawdzeniu poprawności działania modułu z procesorem DSP należy uruchomić środowisko LabVIEW. W celu wygenerowania okna projektu należy posłużyć się kreatorem (w oknie głównym środowiska w zakładce *Targets* należy wybrać *Blackfin Project*). Podczas procesu budowania okna projektu należy zaznaczyć opcję *Build Specification*. Projekt należy zapisać w katalogu użytkownika.

W oknie projektu należy utworzyć nowy program (*New >> VI*) dla procesora sygnałowego. W oknie diagramu blokowego, na palecie funkcji, zamiast standardowych funkcji dostępnych w środowisku LabVIEW, widoczne są funkcje dedykowane dla procesorów DSP Black Fin (podobnie jak w przypadku układów FPGA czy urządzenia PDA).

W oknie projektu w menu kontekstowym dla *Analog Devices ADSP BF537* należy wybrać opcję *Configure Target*. Należy ustawić następujące parametry (rys. 1):

1. *Silicon Revision* = 0.3 (zakładka *Target Configuration*),
2. *Front Panel/Probe Update Period* = 100 (zakładka *Debug Options*),
3. *Host IP* = 192.168.0.1 (zakładka *Debug Options*),
4. *Max Array Elements* = 480 (zakładka *Debug Options*).

Konfigurację należy zaakceptować wciskając przycisk *OK*.



Rys. 1. Okno konfiguracji urządzenia BF-537.

W oknie projektu należy rozwinąć gałąź *Analog Devices ADSP BF537*, w niej *Build Specifications*, a następnie otworzyć właściwości znajdującego się tam pliku (*VDK Application*). W otwartym oknie właściwości należy ustawić dane parametry: (numer oznacza numer pozycji na liście kategorii po lewej stronie, a plus zaznaczenie danej opcji. Reszta opcji w każdej z omawianych kategorii ma być wyłączona):

1. *Enable debugging* +
Generate guard code +
2. *TCP port* +
3. *Enable IwIP TCP/IP support* +
IP address = 192.168.0.2
Subnet mask = 255.255.255.0
Gateway = 192.168.0.0
Mac in target memory +
Processor Status Window +
4. (wszystko wyłączone)

Połączenie pomiędzy modulem, a komputerem jest w pełni skonfigurowane. Aby uruchomić program, należy zapisać wszystkie pliki projektu, a następnie z menu kontekstowego dla *VDK Application* wybrać opcję *Run/Debug* (w zależności od tego, czy chcemy tylko obserwować efekty działania programu, czy też uruchomić go w standardowym dla środowiska LabVIEW trybie debugowania). Można również korzystać standardowo ze strzałki na górnym pasku w środowisku LabVIEW. Każde uruchomienie programu po wprowadzeniu zmian powoduje ponowne zbudowanie plików *.c, które przesyłane są do pamięci procesora.

Użyty model konfiguracyjny wykorzystany jest ze względu na stosowaną w ćwiczeniu metodę połączenia (z użyciem protokołu TCP/IP do debugowania). Metoda ta umożliwia najszybszą komunikację komputera z układem. Po skończonym ćwiczeniu można przetestować szybkość działania zaimplementowanych algorytmów po odpięciu kabla Ethernet i odpowiednim przestawieniu właściwości połączenia z TCP port na JTAG/EZ-KIT USB. Podczas realizacji ćwiczeń uwzględnić należy fakt, iż program (jego główna pętla *WHILE*) powinien pracować nieustannie do momentu zatrzymania (wyłączenia go przyciskiem *STOP*).

Ad 3. Obsługa wyjścia analogowego

Należy napisać program zgodnie z poniższą specyfikacją:

1. Program ma generować funkcję sinusoidalną o znanej, określonej przez użytkownika częstotliwości w zakresie 200 Hz – 20 kHz (z krokiem 200 Hz), a następnie wyświetlać wygenerowaną funkcję na wykresie i odtwarzać ją na wyjściu sygnału audio. Dźwięki generowane przez program mają być czyste, nie 'brzęczące' (każdy wygenerowany sinus ma mieścić się całkowitą liczbę okresów w zadanej odgórnie, podczas inicjalizacji liczby próbek),
2. Wartość amplitudy generowanego sygnału należy ustawić na 2e6,
3. Podczas realizacji zadania należy wykorzystać informację, iż częstotliwość próbkowania sygnału audio dla procesora ADSP-BF537 jest równa 48 kHz,

4. W celu zainicjalizowania urządzenia zewnętrznego (wyjście liniowe - AD1854) należy użyć funkcji *Initialize Audio* z palety *Blackfin*. Liczba próbek (wejście tej funkcji) jest wielkością bufora danych, przypisanego inicjalizowanemu urządzeniu.

W celu odtwarzania dźwięku z użyciem procesora niezbędne jest dokonanie dwóch operacji. Pierwszą z nich jest ZAINICJALIZOWANIE urządzenia, będące, w dużym skrócie, operacją przypisania mu pewnego miejsca w pamięci, z którego będzie czerpał dane (bufora), oraz uruchomienia przepływu danych z urządzenia. Drugą operacją jest ZAPISANIE DO BUFORA danych, które następnie są generowane jako dźwięk. Zapis do bufora odbywa się przy użyciu funkcji *Device Set Buffer*, której użycie omówiono poniżej. Zapis jest, najprościej ujmując, skopiowaniem tablicy z danymi do tablicy będącej buforem. Pamiętać jednak należy, że sygnał stereofoniczny powstaje poprzez wysyłanie próbek sygnału naprzemiennie na kanał lewy i prawy. Oznacza to, że pojedyncza sinusoida zapisana w tablicy nie wystarczy do odtworzenia dźwięku. Co więcej, liczba próbek generowanego sinusa powinna – w obliczu przedstawionych faktów – mieścić się dwukrotnie w wielkości bufora.

Do wygenerowania sygnału sinusoidalnego należy użyć funkcji *Sine Pattern*. Sygnał należy tak przetworzyć, aby mógł być odtworzony na wyjściu urządzenia (stworzyć dwa jednakowe kanały ‘splcione’ ze sobą naprzemiennie w jednej tablicy). Do splecenia należy skorzystać z odpowiedniej funkcji odnoszącej się do tablic.

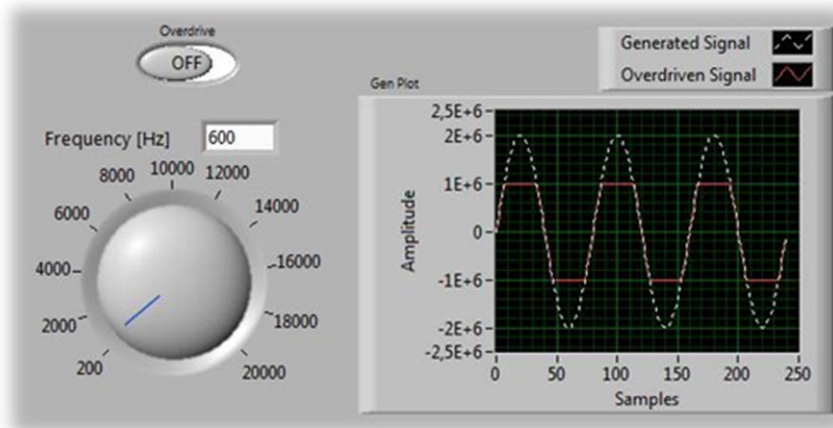
W celu odtworzenia danej sekwencji sygnałowej przez urządzenie, należy użyć funkcji *Device Set Buffer* z palety *Blackfin*. Na wejściu należy podać referencję do bufora transmisji (wygenerowaną uprzednio przez funkcję *Initialize Audio* na odpowiednim wyjściu), dane do zapisania w buforze, oraz numer pod-bufora do użycia. Program ma korzystać z dwóch pod-buforów, używając ich naprzemiennie (w każdym przejściu pętli innego niż w przejściu poprzednim).

Po zaprojektowaniu programu o zadanej funkcjonalności, należy wzbogacić go o efekt *overdrive*. Polega on na obcinaniu (*clipping*) wartości funkcji wejściowej do pewnego narzuconego przedziału. W tym zadaniu przedział ten powinien rozciągać się od $-1e6$ do $+1e6$ (obcinamy amplitudę przebiegu o połowę). Panel frontowy powinien wyglądać jak pokazano na rysunku 2 (efekt działania funkcji *overdrive* uwidocznił na wykresie).

Ponieważ procesor taktowany jest z częstotliwością 600 MHz, możliwe jest niebezpośrednie przesyłanie generowanych sygnałów do wyjścia (opóźnienie rzędu $1/600000000$ sekundy nie jest odczuwalne dla człowieka). Z tej niedoskonałości ludzkiego układu nerwowego można korzystać implementując bardziej zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów z użyciem procesora BF537.

Ad 4. Implementacja maszyny stanów

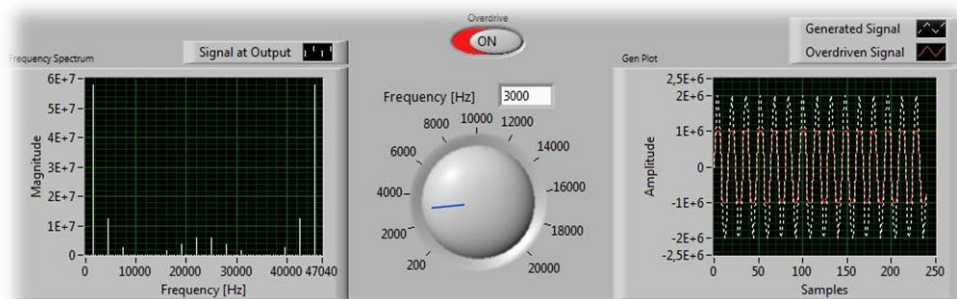
Należy zmodyfikować napisany program tak, aby wykorzystywał on architekturę maszyny stanów. Działanie programu ma być dokładnie takie samo, zmienia się tylko sposób



Rys. 2. Okno konfiguracji urządzenia BF-537.

jego implementacji. Maszyna powinna zawierać stan dla każdej operacji wykonywanej przez program, a dźwięk powinien być odtwarzany BEZ przerywania.

Po uruchomieniu programu i stwierdzeniu poprawnego działania, należy dodać stan, w którym obliczona zostanie 96 punktowa Transformata Fouriera sygnału odtwarzanego w głośnikach. Moduł obliczonej transformaty powinien być wyświetlany na odpowiednio wyskalowanym wykresie (rysunek 3). Należy użyć funkcji z palety przetwarzania sygnałów LabVIEW.



Rys. 3. Program z dodatkowym modułem wyznaczania FFT.

Ad 5. Obsługa analogowego wejścia

Zadaniem kolejnego programu jest przeprowadzenie prostej analizy sygnału podanego na wejście liniowe z użyciem filtracji cyfrowej oraz transformacji Fouriera. Działanie programu powinno być następujące:

1. Program ma działać w oparciu o architekturę maszyny stanów,
2. Program ma dokonywać akwizycji sygnału z wejścia liniowego, następnie jeden z kanałów należy poddać filtracji cyfrowej z użyciem filtru FIR (o skończonej odpowiedzi impulsowej), a następnie wyświetlenie modułu 96-punktowej transformaty Fouriera tego sygnału,
3. Do filtracji należy użyć funkcji *FIR Filter* z palety *Blackfin*, dla której współczynniki należy wygenerować korzystając z funkcji zawartej w bibliotece przetwarzania sygnałów LabVIEW. Przed wykonaniem filtracji, współczynniki powinny zostać przekształcone na reprezentację *Fractional16* (będącą definicją typu dla procesora *Blackfin* – funkcja w bibliotece *Blackfin*>>*Numeric*>>*Conversion*),
4. Program powinien zawierać przełącznik, powodujący włączenie/wyłączenie filtracji,
5. Program należy przetestować obserwując w jego widmie częstotliwościowym (odpowiednio wyskalowanym) efekt zastosowanego filtru.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z kartą pomiarową i środowiskiem LabVIEW,
2. Moduł ewaluacyjny Analog Devices ADSP BF537,
3. Oscyloskop,
4. Generator.

Ćwiczenie 7

Wykorzystanie kamery w systemie kontrolno-pomiarowym

Program ćwiczenia

1. Konfiguracja kamery w systemie pomiarowym,
2. Przygotowania stanowiska i *Vision Assistant*,
3. Akwizycja obrazu w środowisku *LabVIEW*,
4. Analiza obrazu w środowisku *LabVIEW*.

Zakres wymaganych wiadomości

Programowanie w środowisku *LabVIEW*, podstawy analizy obrazów.

Literatura

- [1] www.ni.com
- [2] T. Klinger. *Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision*. Prentice Hall, 2003.
- [3] P. Maj. *Wirtualne Systemy Kontrolno-Pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Konfiguracja kamery w systemie pomiarowym

Budując system pomiarowy oparty o komponenty wizyjne, należy wziąć pod uwagę wiele aspektów takiego rozwiązania. Jednym z nich jest wybór kamery. W niniejszym ćwiczeniu będzie używana kamera internetowa ze względu na jej niskie koszty, jednak w szybkich procesach można użyć innych urządzeń podłączanych przy pomocy karty *Frame-grabber*, protokołu IEEE 1394, złącze analogowe lub, coraz częściej, Ethernet.

Aby urządzenia wizyjne można było zintegrować w systemie kontrolno-pomiarowym, budowanym w środowisku *LabVIEW*, niezbędny jest dodatkowy moduł *NI Vision*. Jest to zestaw narzędzi pozwalających na procesowanie i analizowanie obrazów z użyciem zestawu zoptymalizowanych funkcji MMX dla takich zadań jak np.:

- wyświetlanie obrazów w skali szarości, w skali kolorów lub binarnie,
- procesowanie obrazu zawierające elementy statystyki, filtrowanie i przekształcenia geometryczne,
- cechowanie,
- klasyfikacja,
- rozpoznawanie znaków (OCR).

W niniejszym ćwiczeniu używane będzie dodatkowo narzędzie *Vision Assistant*, pozwalające na kompletną konfigurację zadania pomiarowego, a następnie na przekształcenie go na kod programu w języku graficznym. *Vision Assistant* używa funkcji zawartych w bibliotece *Vision*, jednak może być użyty jako niezależne narzędzie programistyczne (konfiguracyjne).

W ćwiczeniu użyta zostanie kamera internetowa, przez co należy odwołać się do zewnętrznego oprogramowania danej firmy, aby ustawić odpowiednie parametry urządzenia. Sam obraz odbierany będzie przez sterowniki IMAQ Vision (funkcje pozwalające na akwizycję i budowanie obrazów).

Ad 2. Przygotowanie stanowiska i *Vision Assistant*

W tym punkcie należy zwrócić uwagę na kilka ważnych elementów dotyczących akwizycji obrazów, takich jak:

Rozdzielczość pomiaru – mówi o liczbie detali, które mają być zaobserwowane,

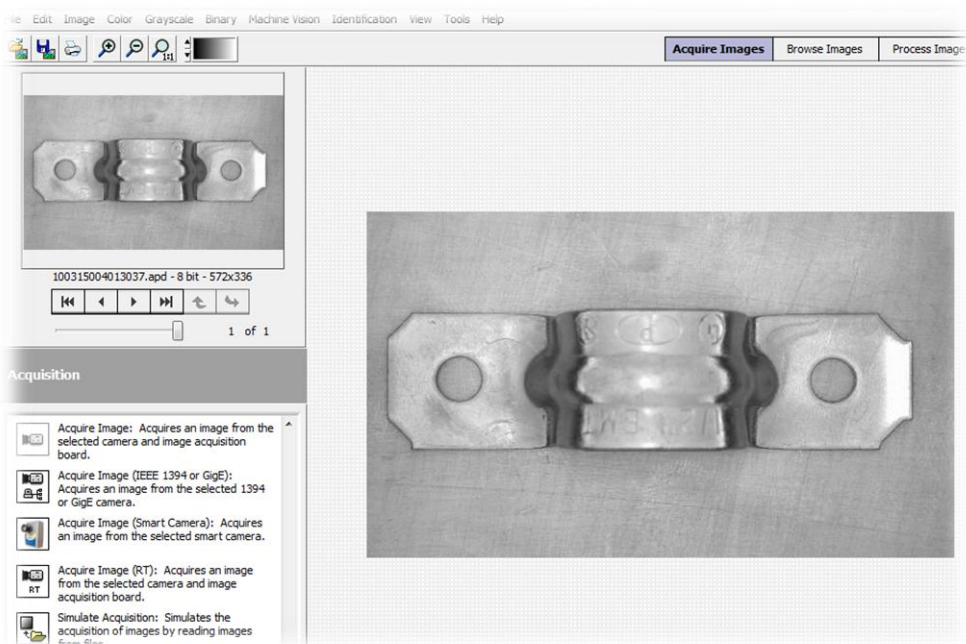
Oświetlenie – jest jednym z najważniejszych elementów ustawianych podczas przygotowania stanowiska do pracy. Odpowiednie oświetlenie powoduje, że praca nad analizą rejestrowanych obrazów jest łatwiejsza i szybsza.

Należy uruchomić program *Vision Assistant* znajdujący się na palecie programów w menu *National Instruments*. Następnie należy wcisnąć przycisk *Acquire Image*, aby przejść do głównego okna programu (rysunek 1). W menu *Acquisition* należy wybrać dostępną na stanowisku kamerę.

Po skonfigurowaniu kamery i upewnieniu się, że obraz jest widoczny w oknie programu *Vision Assistant*, można otworzyć zakładkę *Process Images* i zapoznać się z funkcjami pozwalającymi na przetwarzanie obrazu.

Ad 3. Akwizycja obrazu w środowisku *LabVIEW*

W poprzednim punkcie ćwiczenia udało się dokonać akwizycji obrazu przy pomocy kreatora. Przy pomocy kreatora można również zdefiniować cały tor analizy obrazu, a następnie przekształcić go na kod zapisany w graficznym języku programowania. W przypadku systemów wizyjnych, programowanych w *LabVIEW* jest to bardzo dobra i często stosowana metoda, ze względu na dużą efektywność. Jednak należy wiedzieć w jaki sposób dokonuje się akwizycji obrazu w samym środowisku.



Rys. 1. Okno programu *Vision Assistant* z obrazem wczytanym z pliku.

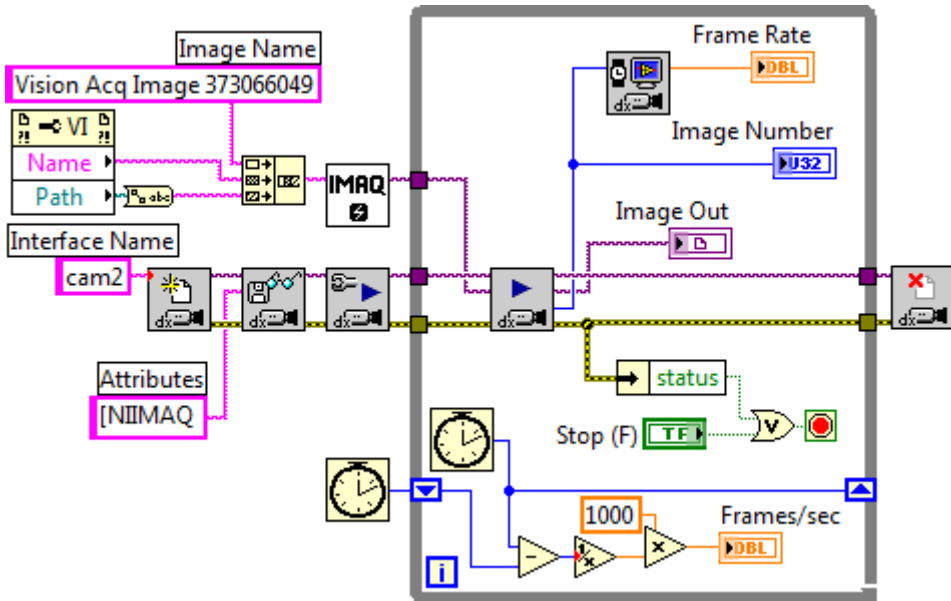
Należy otworzyć środowisko *LabVIEW*, a następnie nowy program (*NEW >> VI*). Na palecie funkcji należy wybrać *Vision / Motion* a następnie *Vision Express >> Vision Acquisition*. Funkcja kreatora zadania pomiarowego przeprowadzi użytkownika przez proces generowania kodu, gdzie na kolejnych zakładkach należy wybierać odpowiednie opcje:

1. *Select Acquisition Source* - dostępna na stanowisku kamera,
2. *Select Acquisition Type* - *Continuous Acquisition with inline processing*
3. *Configure Acquisition Settings* - bez zmian, można wcisnąć przycisk *Test*,
4. *Select Controls / Indicators* - zaznaczyć wszystkie opcje, wcisnąć *Finish*,

Po wykonaniu powyższych czynności wygenerowany zostanie kod w środowisku *LabVIEW*. Należy uruchomić program i sprawdzić jego działanie.

Po potwierdzeniu poprawności działania kodu należy w oknie diagramu blokowego z menu kontekstowego dla funkcji *Vision Acquisition* wybrać opcję *Open Front Panel* i dalej przycisk *Convert*.

Należy przeanalizować kod programu i zidentyfikować używane struktury typu *Functional Global*. Należy usunąć niepotrzebne struktury i dodać funkcjonalność akwizycji ciągłej ze wskazaniem liczby klatek zbieranych w czasie jednej sekundy. Wartość ta powinna być przeliczana w każdej iteracji głównej pętli programu. Program powinien wyglądać jak na rysunku 2.



Rys. 2. Programowa realizacja akwizycji obrazu z kamery internetowej.

W przedstawionym programie należy zauważyć, że funkcja *IMAQdx Grab.vi* umieszczona jest w pętli *While*, przez co dokonywana jest akwizycja ciągła, a wykorzystane funkcje *Thick Count* pozwalają określić czas pomiędzy kolejnymi krokami akwizycji. Należy zauważyć, że gotowa i automatycznie umieszczona w pętli funkcja *Vision Acquisition Calculate FPS* zwraca podobną wartość, jednak uśrednioną za pewien przedział czasu.

Ad 4. Analiza obrazu w środowisku *LabVIEW*

Zbudowany program pozwala na akwizycję obrazu i pokazanie go na interfejsie użytkownika. W programie widoczne są dwie referencje – jedna tworzona przez program *IMAQdx Open Camrea.vi* – jest to referencja do wątku akwizycji (do urządzenia), druga referencja dotyczy tymczasowego bufora pamięci tworzonych przez funkcję *IMAQ Create* (patrz rys. 2). Jest to miejsce, do którego wpisywany będzie obraz podczas akwizycji. Aby dokonać analizy obrazu należy odwołać się do odpowiednich funkcji z palety *Vision Utilities* oraz *Vision Processing*, gdzie głównym elementem każdej funkcji będzie referencja do obrazu.

Należy zapoznać się z możliwymi opcjami analizy obrazu, a następnie w napisany program wpisać dodatkową funkcjonalność, która np. określi poziom cieczy w obserwowanym zbiorniku, rozpozna zadany kształt, wyznaczy rozmiar danego przedmiotu lub rozpozna tekst zapisany na kartce.

W przypadku problemów z implementacją algorytmu należy odwołać się do okna pomocy i zawartych w środowisku przykładów, takich jak przedstawiony na rysunku 3.

**POMIARY ELEKTRYCZNE
WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH**

opracował

dr inż. Waław Gawędzki

Ćwiczenie 1

Badanie właściwości metrologicznych komputerowego systemu akwizycji danych pomiarowych z wykorzystaniem uniwersalnej karty pomiarowej i oprogramowania DasyLab

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze środowiskiem programowania DasyLab za pomocą programu demonstracyjnego.
2. Konfigurowanie karty pomiarowej w środowisku DasyLab.
3. Sposoby podłączania źródeł napięcia do karty pomiarowej.
4. Dobór częstotliwości próbkowania (aliasing) karty pomiarowej.
5. Analiza FFT sygnałów w czasie rzeczywistym, badanie funkcji okna czasowego.
6. Badanie metod uśredniania sygnałów - usuwanie szumu poprzez uśrednianie sygnałów.
7. Formaty zapisu danych.

Zakres wymaganych wiadomości

Budowa, funkcje i parametry kart pomiarowych. Podłączanie źródeł napięcia do karty pomiarowej (wejście niesymetryczne (single ended - S/E), wejście symetryczne (differential – Diff)). Zasada doboru częstotliwości próbkowania (aliasing). Filtry antyaliasingowe – cel stosowania. Rodzaje zakłóceń i metody ich eliminacji.

Literatura

- [1] DasyLab 9.0 *User Guide* (<http://www.dasylab.net>).
- [2] Karty pomiarowe serii NI 622x firmy National Instruments (<http://www.ni.com>).
- [3] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, Warszawa, 2002.
- [4] T. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [5] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się ze środowiskiem programowania DasyLab za pomocą programu demonstracyjnego

Uruchamiamy skrót *DasyLab_demo* do programu *demo32.exe*. W oknie *DemoShieldPlayer* wybieramy plik *dlab.dbd* oraz klikamy **Otwórz**. Pojawi się powitalne okno programu demonstracyjnego DasyLab. Wybieramy klawisz **Continue**, a następnie *DasyLab Guided Tour* i *First Steps*.

Mamy teraz do dyspozycji 3 programy demonstracyjne:

- **Demo 1** pokazuje, jak utworzyć prosty, jednokanałowy tor akwizycji i bieżącej wizualizacji sygnału.
- **Demo 2** pokazuje, jak rozszerzyć poprzednią aplikację o dodatkowe kanały wejściowe.
- **Demo 3** pokazuje, jak utworzyć prosty tor analizy FFT sygnału w czasie rzeczywistym.

Ad 2. Konfigurowanie karty pomiarowej w środowisku DasyLab

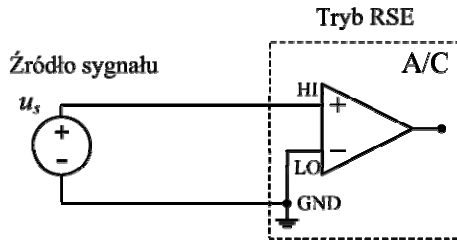
Przed zbudowaniem systemu pomiarowego wykorzystującego uniwersalną kartę pomiarową należy określić jej podstawowe parametry pracy: zakresy pomiarowe poszczególnych kanałów, tryby pracy oraz częstotliwość próbkowania. Parametry te powinny być poprawnie dobrane do konkretnego, planowanego eksperymentu. Wykorzystywana podczas ćwiczenia karta pomiarowa NI 6221 (lub NI 6036) używa dostarczonego przez producenta oprogramowania konfiguracyjnego *Measurement & Automation Explorer* (w skrócie MAX) oraz sterownika NI-DAQmx. Od strony programisty czy oprogramowania wykorzystującego kartę (np. DasyLab) oprogramowanie MAX stanowi bardzo rozbudowany, a jednocześnie prosty w użyciu sterownik szerokiej rodziny sprzętu pomiarowego. Do zarządzania wieloma konfiguracjami dla tej samej karty pomiarowej środowisko MAX używa tzw. zadań (ang. *task*).

W programie DasyLab parametry konfiguracyjne karty pomiarowej zostały podzielone na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią parametry sprzętowe (dostępne w menu *Experiment\Hardware Setup*) i są to przede wszystkim zakresy napięciowe oraz tryby pracy kanałów pomiarowych. Zapisywane są one w programie konfiguracyjnym MAX w postaci zadań (*task'ów*). Drugą grupę stanowią parametry eksperymentu (menu *Experiment\Experiment Setup*), gdzie m. in. ustalana jest częstotliwość próbkowania dla konkretnego zadania. Szczegółowy diagram połączeń poszczególnych sygnałów do złącza karty pomiarowej określonego typu, można znaleźć w programie konfiguracyjnym MAX (w zakładce dotyczącej danego typu karty, polecenie *device pinouts* menu kontekstowego).

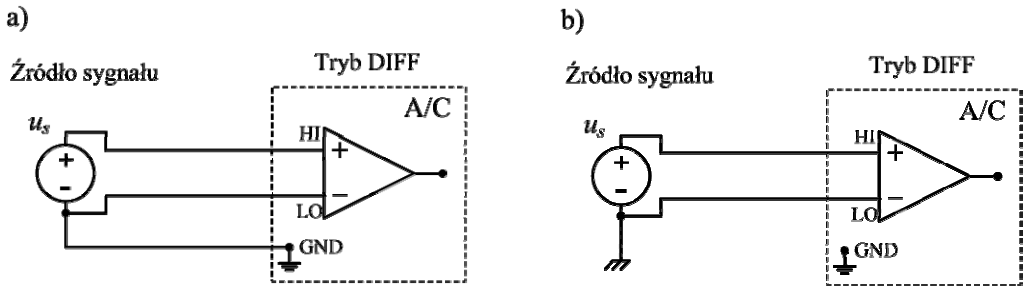
Ad 3. Sposoby podłączania źródeł napięcia do karty pomiarowej

Analogowe sygnały pomiarowe mogą być podłączane do karty pomiarowej w trybach: różnicowym (differential), i niesymetrycznych: RSE (referenced single ended), lub NRSE (nonreferenced single ended). W trybie różnicowym można mierzyć napięcia odniesione do różnych mas, a sygnały podłącza się do zacisków wejściowych HI i LO wzmacniacza karty.

Tryb RSE pozwala mierzyć napięcia odniesione do wspólnej masy połączonej z masą karty pomiarowej. Tryb NRSE pozwala mierzyć napięcia odniesione do wspólnego potencjału o innej wartości, niż potencjał masy karty pomiarowej. Na rys. 1 i 2 pokazano schematy układów połączeń dla omawianych trybów.



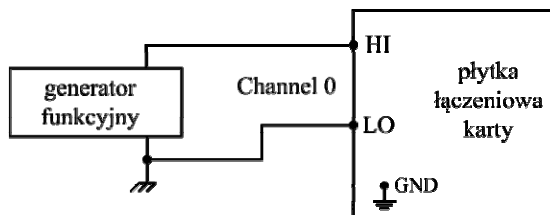
Rys. 1 Schemat połączenia w trybie niesymetrycznym RSE (*single ended*), u_s – symetryczne źródło sygnału.



Rys. 2. Schemat połączenia w trybie symetrycznym DIFF (różnicowym), a) u_s – symetryczne źródło sygnału (impedancja źródła mniejsza, niż 100 Ω), b) niesymetryczne źródło sygnału.

Ad 4. Dobór częstotliwości próbkowania (aliasing) karty pomiarowej

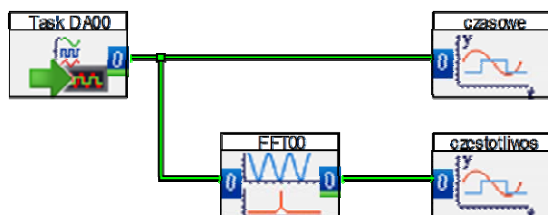
W celu wyjaśnienia zasady poprawnego doboru częstotliwości próbkowania należy podłączyć dostępny na stanowisku laboratoryjnym generator funkcyjny sygnału do wejścia przetwornika A/C karty pomiarowej, zgodnie ze schematem z rys. 3. Połączenia dokonujemy wykorzystując listwę montażową karty pomiarowej zgodnie z przedstawioną na rys.2b zasadą łączenia niesymetrycznego źródła sygnału z kartą pomiarową w trybie różnicowym..



Rys. 3. Schemat połączenia generatora sygnału z kartą pomiarową w trybie różnicowym.

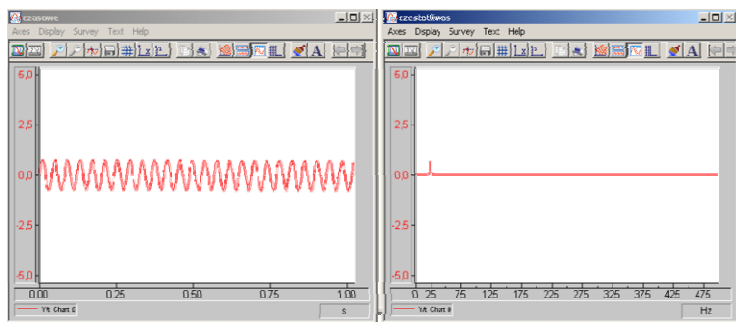
Po uruchomieniu programu DASYLab budujemy system z następujących bloków funkcyjnych (rys. 4):

- przetwornik A/C (Task DA Input),
- oscyloskop (Y/t Chart) – 2 bloki do wizualizacji przebiegów w dziedzinie czasu i częstotliwości,
- blok realizacji analizy FFT sygnału.



Rys. 4. Schemat blokowy prostego systemu akwizycji danych.

Należy skonfigurować zakres pomiarowy kanału AI0 i dobrać amplitudę sygnału na generatorze tak, by rejestrowany przebieg sinusoidalny nie przekraczał zakresu pomiarowego karty. Częstotliwość próbkowania należy ustawić na 1 kHz. Używając zewnętrznego generatora należy płynnie zwiększać częstotliwość generowanej sinusoidy od kilkudziesięciu herców do 1 kHz. Jednocześnie należy obserwować kształt rejestrowanego sygnału oraz położenie prążka widma sygnału (rys. 5).

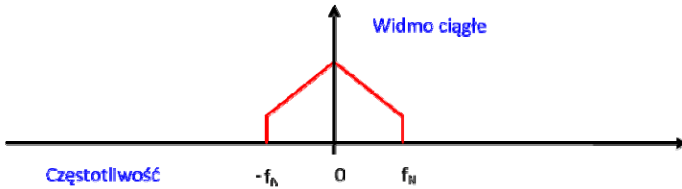


Rys. 5. Przykładowe wyniki obserwacji, częstotliwość próbkowania $f_s=1$ kHz, sygnału $f=25$ Hz.

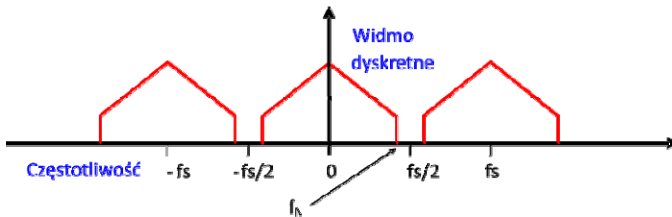
Czy domyślna, liniowa skala na osi amplitudy wykresu analizy częstotliwości jest właściwa i ułatwia obserwację widma? Przy jakiej częstotliwości rejestrowany sygnał nadal „przypomina” sinusoidę? Czy zawsze wraz ze wzrostem zadawanej częstotliwości sygnału wejściowego, prążek widma rejestrowanego sygnału przesuwa się „z lewej na prawo”? Jak zmienia się kształt i częstotliwość rejestrowanego sygnału dla częstotliwości bliskiej 25 Hz, 100 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 750 Hz, 1 kHz? Jak można wytłumaczyć zaobserwowane przebiegi?

Po przeprowadzeniu opisanych wyżej eksperymentów zrozumiała stała się zasada doboru częstotliwość próbkowania zgodnie z twierdzeniem Nyquista, mówiącym, że częstotliwość próbkowania f_s winna być co najmniej dwukrotnie wyższa od najwyższej częstotliwości w widmie sygnału f_N , tzn. $2f_N < f_s$. Wiadome są również skutki niespełnienia tego

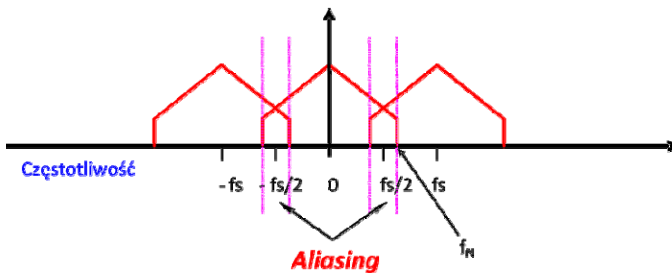
warunku dla kształtu rejestrowanego sygnału. Łatwo można to jeszcze raz prześledzić w dziedzinie częstotliwości (rys. 6 – rys. 8).



Rys. 6. Ciągłe widmo sygnału.



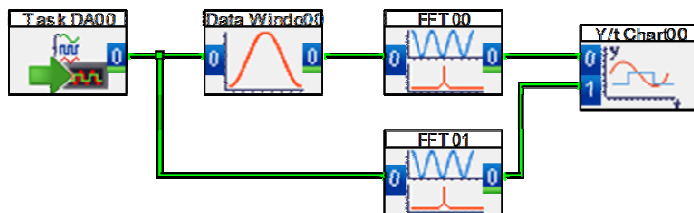
Rys. 7. Powielenia widmowe sygnału próbkowanego, gdy jest spełniony warunek $f_s > 2f_N$.



Rys. 8. Nakładanie się widm i aliasing, gdy częstotliwość próbkowania jest zbyt niska, nie jest spełniony warunek Nyquista, albowiem zachodzi $f_s < 2f_N$.

Ad 5. Analiza FFT sygnałów w czasie rzeczywistym, badanie funkcji okna czasowego

Zestawmy schemat systemu pomiarowego zgodnie z rys. 9. Należy ustalić częstotliwość próbkowania $f_s=1$ kHz, a częstotliwość sygnału wejściowego z generatora będzie regulowana w zakresie od 0 do 500 Hz (zgodnie z twierdzeniem Nyquista). Zmieniając częstotliwość sygnału wejściowego należy obserwować w oknie wizualizacyjnym widmo sygnału wejściowego. Obserwujemy widmo sygnału bez okna czasowego (przypadek okna prostokątnego) oraz dla różnych rodzajów okien czasowych (wybór rodzaju okna w bloku *Data Window*). Eksperyment powtarzamy dla różnych kształtów sygnału (sinus, trójkąt, prostokąt). Obserwacje należy prowadzić dla wyskalowanej w skali logarytmicznej osi amplitudowej charakterystyki widmowej. Notujemy wnioski.



Rys. 9. Schemat układu do analizy FFT sygnału pomiarowego dla różnych okien czasowych.

Ad 6. Badanie metod uśredniania sygnałów

Wszelkie zakłócenia badanego sygnału są spowodowane zarówno naturą mierzonej wielkości, jak i oddziaływaniem otoczenia oraz urządzeń pomiarowych. Zakłócenia tego typu nazywane są szumem. W praktyce cyfrowego przetwarzania sygnałów szum można minimalizować poprzez proces uśredniania. Uśrednianie pojawia się w algorytmach detekcji sygnału, ale także w filtrach dolnoprzepustowych. W cyfrowym przetwarzaniu sygnałów uśrednianie często przybiera postać sumowania ciągu próbek sygnału w dziedzinie czasu, a potem dzieleniu tej sumy przez liczbę próbek. Matematycznie uśrednianie N próbek ciągu $x(n)$, którego wartość oznaczymy przez X , jest wyrażone następująco:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (1)$$

Uśrednianie koherentne.

W procesie realizowanego w zbiorach realizacji uśredniania koherentnego (synchronicznego) kluczowym warunkiem jest synchronizacja czasowa, stosowana przy próbkowaniu sygnału pierwotnego. Na przykład, przy uśrednianiu przebiegu sinusoidalnego zanurzonego w szumie, uśrednianie koherentne wymaga, żeby faza sinusoidy była taka sama na początku każdego mierzonego zbioru próbek (czyli każdej realizacji). Gdy wymaganie to zostanie spełnione, uśrednianie przebiegu sinusoidalnego da w wyniku uśrednione po realizacjach wartości chwilowe tego przebiegu, a mający losowy charakter sygnał szumu zostanie wyeliminowany.

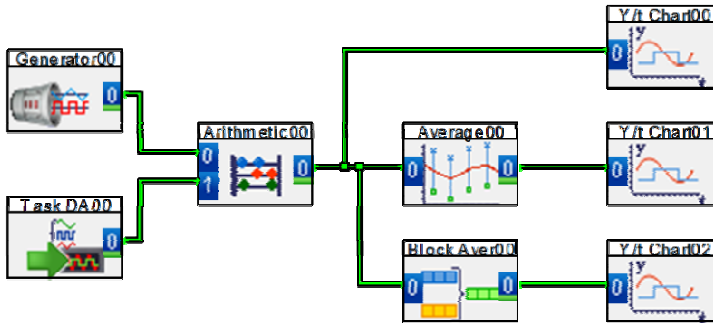
Uśrednianie niekoherentne.

Proces uśredniania niekoherentnego (niesynchronizowanego) jest uśrednianiem próbek sygnału w sytuacji, kiedy nie stosuje się żadnych wymagań dotyczących synchronizacji czasowej próbek; to jest, przedziały czasu pomiaru sygnału nie są w żaden sposób zsynchronizowane z fazą mierzonego sygnału. Uśrednianie niekoherentne w blokach, czyli w pewnych, nie takich samych, fragmentach badanego przebiegu prowadzi, wraz ze wzrostem liczby bloków, do wyznaczenia wartości średniej sygnału za czas pomiaru.

Usuwanie szumu poprzez uśrednianie sygnałów

W programie DasyLab tworzymy schemat układu umożliwiający wygenerowanie zaszumionego sygnału sinusoidalnego. Sygnał ten generowany jest poprzez zsumowanie (w module *Arithmetic*) rzeczywistego sygnału z zewnętrznego generatora (akwizycja sy-

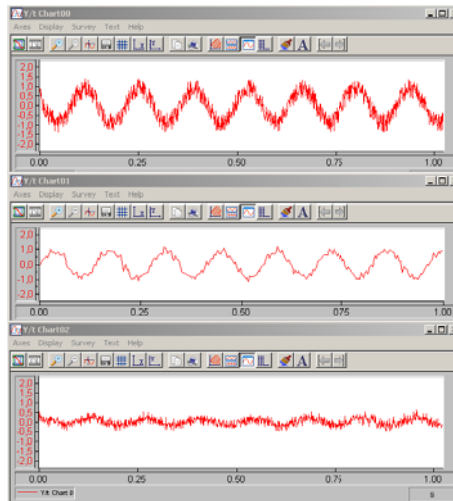
gnału przez blok *Task DA*) z symulowanym w środowisku DasyLab sygnałem szumu – rys. 10. Zaszumiony sygnał jest następnie poddawany operacjom uśredniania w dwóch różnych trybach.



Rys. 10. Schemat blokowy układu do usuwania szumu z sygnału przez uśrednianie.

W trybie pierwszym, w module *Average* realizowana jest operacja uśredniania koherentnego, przy czym wybrać należy opcję uśredniania w zbiorze realizacji (*Block* lub *Blockwise* w zależności od wersji oprogramowania) i wybrać liczbę realizacji, po których przebiega operacja uśredniania.

W trybie drugim w module *Block Average* realizowana jest operacja uśredniania niekoherentnego, przy czym wybrać należy opcję uśredniania blokowego (*Single* lub *Single values* w zależności od wersji oprogramowania) i wybrać liczbę bloków, po których przebiega operacja uśredniania.



Rys. 11. Przykładowe wyniki uśredniania zaszumionego sygnału.

Na rys. 11 pokazano przykładowe przebiegi: sygnału zaszumionego, wynik koherentnego uśredniania zaszumionego sygnału oraz wynik niekoherentnego uśredniania zaszumionego sygnału, obydwa rodzaje uśredniania dla 4 realizacji.

Zauważmy przy okazji działania funkcji uśredniania koherentnego (moduł *Average*), że wraz ze zwiększaniem liczby realizacji zwiększamy skuteczność odszumiania sygnałów, kosztem czasu trwania operacji.

Natomiast dla funkcji uśredniania niekoherentnego (moduł *Block Average*) w trybie *Single* (*Single value*), wzrost liczby bloków (*Blocks*) prowadzi do wyznaczenia wartości średniej sygnału z coraz lepszym przybliżeniem, a równocześnie wydłuża się czas, w którym oczekujemy na wynik. W tym samym module zmiana trybu *Single* na tryb *Running* prowadzi do uśredniania przebiegów na bieżąco. Uśrednianie w trybie *Running* nie jest uśrednianiem po realizacjach (blokach) sygnału, lecz jest uśrednianiem w czasie, tzn. wraz z upływem czasu wyznaczana wartość średnia coraz bardziej zbliża się do rzeczywistej wartości średniej.

Ad 7. Formaty zapisu danych

W trakcie przeprowadzanych eksperymentów można dokonywać zapisu zarejestrowanych danych do pliku na dysk twardy. W tym celu należy połączyć schemat układu pomiarowego zgodnie z rys. 12.



Rys. 12. Schemat układu pomiarowego z zapisem danych do pliku.

Wyboru formatu danych dokonuje się w module *Write*. W programie *DASYLab* jest zaimplementowana duża liczba formatów zapisu danych, a do najważniejszych należą:

- IEEE32 – rozszerzenie *.I32, format binarny, dane zapisywane są w kolumnach w formacie IEEE – 4 bajty na każdą zmierzoną wartość,
- ASCII – rozszerzenie *.ASC,
- DASYLab – rozszerzenie *.DDF lub *.DDB – format zapisu programu *DASYLab*.

Zapis danych w różnych formatach umożliwia ich łatwe użycie w oprogramowaniu innego typu.

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym,
2. Karta pomiarowa NI6221 wraz z układem przyłączeniowym,
3. Generator funkcyjny (sinus, prostokąt, trójkąt),
4. Oprogramowanie DASYLab wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
5. Program demonstracyjny DASYLab.

Ćwiczenie 2

Budowa i konfigurowanie systemu do pomiaru parametrów klimatycznych z wykorzystaniem karty pomiarowej i oprogramowania DasyLab

Program ćwiczenia

1. Identyfikacja połączeń czujników zastosowanych w układzie pomiarowym.
2. Konfigurowanie i skalowanie torów do pomiaru temperatury z wykorzystaniem termorezystora Pt100, oraz termistora NTC 100 Ω ,
 - a. wyznaczenie funkcji skalujących tory pomiarowe,
 - b. projekt części software'owej systemu pomiarowego,
 - c. pomiarowa identyfikacja parametrów termistora.
3. Rejestracja odpowiedzi skokowych czujników temperatury.
4. Konfigurowanie i skalowanie torów do pomiarów temperatury, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej powietrza z wykorzystaniem czujników stosunkowych,
 - a. wyznaczenie funkcji skalujących tory pomiarowe,
 - b. projekt części software'owej systemu pomiarowego.

Zakres wymaganych wiadomości

Budowa, funkcje i parametry kart pomiarowych. Podłączanie źródeł napięcia do karty pomiarowej (wejście niesymetryczne *single ended*, wejście symetryczne *differential*). Zasada działania czujników termorezystancyjnych, termistorowych, zintegrowanych stosunkowych czujników temperatury, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej powietrza.

Literatura

- [1] DasyLab 9 i 10 *User Guide* (<http://www.dasylab.net>).
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [4] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski. *Termometria.*, Wyd. PŁ, Łódź, 1998.

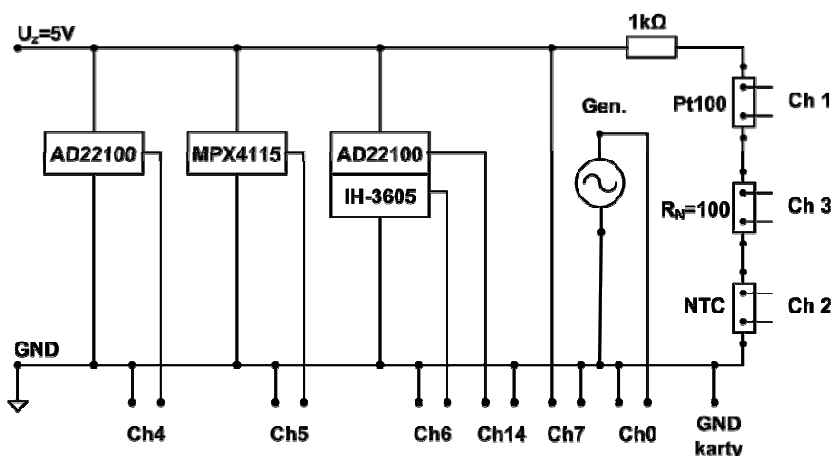
Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Identyfikacja połączeń czujników zastosowanych w układzie pomiarowym

Celem ćwiczenia jest zaprojektowanie i wykonanie w środowisku DasyLab systemu pomiarowego oraz przeprowadzenie procedur skalowania w torach do pomiaru temperatury, za pomocą różnych typów czujników: termorezystora Pt100, termistora NTC100, oraz zintegrowanych czujników stosunkowych temperatury AD22100, ciśnienia bezwzględego MPX4115 oraz wilgotności względnej IH-3605A.

W ramach realizacji punktów ćwiczenia należy opracować następujące zagadnienia:

- ustalić wielkości, które należy mierzyć i rejestrować,
- wyznaczyć funkcję skalującą, umożliwiającą wyliczanie wartości mierzonych,
- skonfigurować kartę pomiarową w środowisku DasyLab,
- wykonać projekt części software'owej systemu pomiarowego w środowisku DasyLab.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego z czujnikami.

Tabela 1.

Zestawienie typów czujników, numerów kanałów i trybów połączeń do karty oraz złącz.

Wejście	Kanał	Tryb	Złącze
Generator	Ch 0	Diff	BNC
Pt100	Ch 1	Diff	laborat.
NTC	Ch 2	Diff	laborat.
$R_N=100\Omega$	Ch 3	Diff	laborat.
AD22100	Ch 4	RSE	Na stałe
MPX4115	Ch 5	RSE	Na stałe
U_z	Ch 7	RSE	7 pinowe
AD22100	Ch 14	RSE	GMT8
IH-3605A	Ch 6	RSE	GMT8

Ad 2. Konfigurowanie i skalowanie torów do pomiaru temperatury z wykorzystaniem termorezystora Pt100, oraz termistora NTC 100 Ω

Ad 2a. Wyznaczenie funkcji skalujących toru pomiarowe

Zależność pomiędzy rezystancją R_t termorezystora platynowego Pt100, a temperaturą T dla temperatur dodatnich aproksymuje się, zgodnie z normą, funkcją wielomianową:

$$R_t = R_0 * (1 + AT + BT^2) \quad (1)$$

$R_0 = 100 \Omega$ - rezystancja termorezystora w temperaturze $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$,

$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,

$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$,

przy czym dla wąskiego zakresu temperatur (w przedziale od $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do $100 \text{ }^\circ\text{C}$) można założyć aproksymację wielomianem I stopnia, czyli funkcją liniową:

$$R_t = R_0 * (1 + \alpha T) \quad (2)$$

$R_0 = 100 \Omega$ - rezystancja termorezystora w temperaturze $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$,

$\alpha = 0,00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Przyjmując, że napięcie na rezystorze wzorcowym R_N (rys. 1) mierzone w kanale 3 karty pomiarowej oznaczymy przez U_3 , a napięcie na termorezystorze Pt100, mierzone w kanale 1 karty oznaczymy przez U_1 , możemy wyznaczyć z (2) wartość temperatury:

$$T = \frac{\frac{U_1}{U_3} \cdot \frac{R_N}{R_0} - 1}{\alpha} \quad (3)$$

Podobnie rozwiązując równanie (1) aproksymacji wielomianowej II stopnia otrzymujemy zależność na poszukiwaną wartość temperatury w funkcji mierzonych napięć:

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4 \cdot B \cdot \left(\frac{U_1}{U_3} \cdot \frac{R_N}{R_0} - 1 \right)}}{2 \cdot B} \quad (4)$$

Zależność (4) umożliwia wyznaczenie wartości temperatury T z większą dokładnością niż zależność (3), jednakże dla temperatur w zakresie $0 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$ różnica ta będzie niewielka. Ujawnia się ona dopiero w sposób wyraźny dla temperatur większych od $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

W zastosowaniach praktycznych rezystancję R_T termistora wyznacza się z zależności:

$$R_T = R_{T_0} \cdot e^{B_m \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (5)$$

R_{T_0} - rezystancja termistora w temperaturze T_0 ,

B_m - stała materiałowa termistora określająca jego czułość, wyrażona w K,

T – temperatura termistora w K.

Przyjmując, że napięcie na rezystorze wzorcowym R_N (rys. 1) mierzone w kanale 3 karty pomiarowej oznaczymy przez U_3 , a napięcie na termistorze NTC100 mierzone w kanale 2 karty oznaczymy przez U_2 , to wartość temperatury możemy wyznaczyć z (5):

$$T = \frac{T_0 \cdot B_m}{B_m + T_0 \cdot \ln\left(\frac{U_2 \cdot R_N}{U_3 \cdot R_{T_0}}\right)} \quad (6)$$

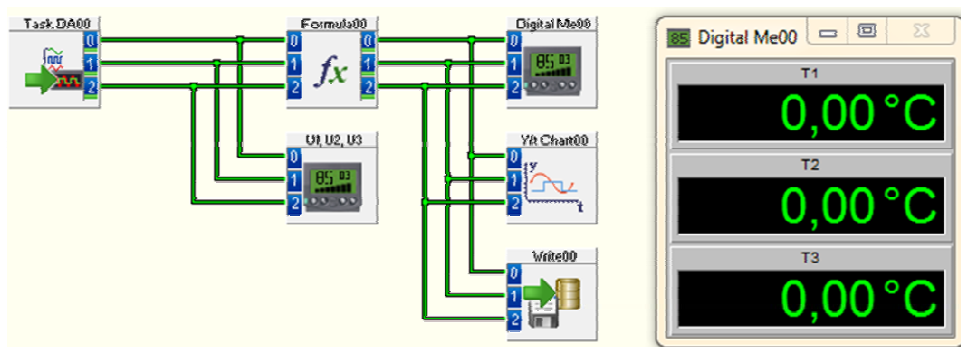
$R_{T_0} = 100 \Omega$ (10%), $T_0 = 298 \text{ K}$ (25 °C), $R_N = 100 \Omega$, $B_m = 3200 \text{ K}$ (3%), T – temperatura termistora w K.

Ad 2b. Projekt części software'owej systemu pomiarowego

W celu budowy systemu wykorzystywane są następujące moduły programu DasyLab:

- akwizycji napięć w kanałach *Task DA* (*Analog Input* z *Modules/Inputs/Outputs/NI-DAQmx*),
- obliczeń matematycznych *Formula* (*Formula Interpreter* z *Modules/Mathematics*),
- wizualizacji numerycznej mierzonych wielkości *Digital Meter* (*Digital Meter* z *Modules/Display*),
- obserwacji rejestrowanych danych w czasie *Y/t Chart* (*Y/t Chart* z *Modules/Display*),
- zapisu danych do pliku na dysk *Write* (*Write Data* z *Modules/Files*).

Każdy z modułów wymaga konfiguracji poprzez wybranie polecenia *Properties* z menu kontekstowego obiektu.



Rys. 2. Schemat układu połączeń bloków funkcyjnych w programie DASYLab.

Trzy formuły w programie wyznaczają wartość mierzonej temperatury na trzy sposoby: T_1 i T_2 na podstawie pomiaru termorezystorem Pt100, zgodnie z funkcjami skalującymi (3) i (4), oraz T_3 na podstawie pomiaru termistorem NTC100 zgodnie z (6).

Ad 2c. Pomiarowa identyfikacja parametrów termistora

Ponieważ rozrzut wartości parametrów seryjnie produkowanych termistorów jest duży (zależność (6), rezystancja R_{T_0} ma tolerancję wykonania 10%, stała materiałowa B_m 3%), wyznaczmy pomiarowo ich wartości indywidualne dla posiadanego egzemplarza czujnika. Wykonujemy pomiar rezystancji termistora R_a i R_b dla 2 różnych temperatur T_a (woda o temperaturze pokojowej) i T_b (woda o temperaturze ok. 80 °C) i wówczas zgodnie z (5):

$$R_{T_b} = R_{T_a} \cdot e^{B_m \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_a} \right)} \quad (7)$$

a poszukiwane wartości stałych wynoszą:

$$B_m = \frac{\ln R_{T_b} - \ln R_{T_a}}{\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_a}} \quad (8)$$

$$R_{T_0} = R_{T_b} \cdot e^{-B_m \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (9)$$

Ad 3. Rejestracja odpowiedzi skokowych czujników temperatury

Po sprawdzeniu poprawności funkcjonowania systemu pomiarowego należy wyznaczyć dynamiczne właściwości czujnika temperatury. W tym celu należy skonfigurować moduł zapisu danych do pliku na dysk, określając nazwę pliku (wraz ze ścieżką) oraz dobrać częstotliwość próbkowania (10 Hz) i przygotować okno wizualizacji (rys. 2).

Uruchamiamy proces pomiaru i po chwili przekładamy czujniki temperatury z termosu z wodą o temperaturze pokojowej do termosu z wodą o temperaturze wyższej (rzędu kilkudziesięciu stopni, np. 70°C). Obserwujemy przebieg zmian temperatury czujnika w oknie wizualizacji. Po ustaleniu wskazań czujnika (ok. kilkadziesiąt sekund), przekładamy czujnik z powrotem do termosu z wodą o temperaturze pokojowej. Po ponownym ustaleniu wskazań czujnika zatrzymujemy pomiar. W ten sposób mamy zarejestrowany proces nagrzewania i chłodzenia czujnika, a odpowiednie dane (czas oraz wartości temperatury) są zarejestrowane w pliku na dysku.

Zinterpretować fizycznie uzyskane przebiegi czasowe. Jakie parametry decydują o wielkości inercji czujnika temperatury (wielkość czujnika, rodzaj materiału, z którego wykonany jest czujnik, środowisko, którego temperaturę mierzy czujnik). Wyznaczyć na podstawie zarejestrowanych przebiegów parametry modelu dynamicznego czujnika (I rzędu – jedna stała czasowa, II rzędu – dwie stałe czasowe).

Ad 4. Konfigurowanie i skalowanie torów do pomiarów temperatury, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej powietrza z wykorzystaniem czujników stosunkowych

Celem tego ćwiczenia jest pomiar ciśnienia atmosferycznego, temperatury i wilgotności względnej powietrza za pomocą zintegrowanych czujników pomiarowych. Czujniki te

posiadają wyjścia napięciowe, stosunkowe. Wielkości mierzone dla tego typu czujników są określane na podstawie pomiaru stosunku napięcia wyjściowego do napięcia zasilającego czujnik.

Ad 4a. Wyznaczenie funkcji skalujących tory pomiarowe

Czujnik o symbolu AD22100 jest zintegrowanym czujnikiem temperatury wyprodukowanym przez firmę Analog Devices, w którym elementem czułym jest termorezystor.

Przyjmując, że napięcie wyjściowe czujnika mierzone w kanale 4 karty pomiarowej oznaczmy przez U_4 , a napięcie zasilające mierzone w kanale 7 karty oznaczmy przez U_7 możemy wyznaczyć wartość temperatury wyrażoną w °C, na podstawie funkcji przetwarzania czujnika:

$$\frac{U_4}{U_7} = 0,275 + T \cdot 0,0045 \quad (10)$$

Czujnik o symbolu MPX4115AP jest zintegrowanym piezorezystywnym czujnikiem ciśnienia bezwzględnego wyprodukowanym przez firmę Motorola, który może służyć do pomiaru ciśnienia atmosferycznego.

Przyjmując, że napięcie wyjściowe czujnika mierzone w kanale 5 karty pomiarowej oznaczmy przez U_5 , a napięcie zasilające mierzone w kanale 7 karty oznaczmy przez U_7 możemy wyznaczyć wartość ciśnienia, na podstawie funkcji przetwarzania czujnika:

$$\frac{U_5}{U_7} = -0,095 + p \cdot 0,009 \quad (11)$$

gdzie p w [kPa].

Czujnik o symbolu IH-3605A jest zintegrowanym wilgotności względnej powietrza (RH – Relative Humidity), produkowanym aktualnie przez firmę Honeywell, w którym elementem czułym jest kondensator z higroskopijnym dielektrykiem.

Przyjmując, że napięcie wyjściowe czujnika mierzone w kanale 6 karty pomiarowej oznaczmy przez U_6 , a napięcie zasilające mierzone w kanale 7 karty oznaczmy przez U_7 , możemy wyznaczyć wartość wilgotności na podstawie funkcji przetwarzania czujnika:

$$\frac{U_6}{U_7} = b_0 + S \cdot RH \quad (12)$$

Czujnik S/N 471: $b_0 = 0,1652$, $S = 0,7471$; Czujnik S/N 89: $b_0 = 0,1664$, $S = 0,7808$.

Aby skorygować wpływ temperatury na pracę czujnika i zwiększyć dokładność pomiaru należy zastosować zalecaną przez producenta funkcję korekcyjną (T w [°F]):

$$RH_{kor} = \frac{RH}{1,093 - 0,0012 \cdot T} \quad (13)$$

RH jest wyznaczoną za pomocą (12) wartością wilgotności względnej, a T jest temperaturą czujnika wilgotności, wyznaczoną za pomocą montowanego w jego pobliżu dodatkowego czujnika temperatury typu AD22100 (napięcie U_{14} w 14 kanale pomiarowym karty – zastosować procedurę wyznaczenia temperatury podobnie do (10)).

Ad 4b. Projekt części software'owej systemu pomiarowego

W celu budowy systemu do pomiarów parametrów klimatycznych należy wykorzystać moduły programu DASYLab w sposób opisany w rozdziale 2b i zastosować funkcje skalujące (10) do (13).

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym,
2. Karta pomiarowa NI6221 wraz z płytką łączeniową,
3. Oprogramowanie DASYLab wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
4. Układ przyłączeniowy czujników i ich zasilania,
5. Rezystor normalny 100 Ω ,
6. Termorezystor Pt100 (wyprowadzenia 4-przewodowe),
7. Termistor NTC 100 Ω (wyprowadzenia 4-przewodowe),
8. Czujnik ciśnienia bezwzględnego MPX4115AP,
9. Czujnik wilgotności względnej powietrza IH-3605A,
10. Czujnik temperatury AD22100,
11. Zasilacz stabilizowany 5V.

Ćwiczenie 3

Pomiar temperatury za pomocą czujników termoelektrycznych i termorezystancyjnych z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych w magistrali szeregowej RS485

Program ćwiczenia

1. Konfigurowanie funkcji pomiarowych i parametrów transmisji przyrządów pomiarowych N12T.
2. Pomiary temperatury za wykorzystaniem przemysłowego miernika typu N12T,
 - a. pomiar temperatury za pomocą termoelementu typu J,
 - b. pomiar temperatury czujnikiem rezystancyjnym Pt100.
3. Konfiguracja mierników i pomiar temperatur z wykorzystaniem interfejsu RS485.

Zakres wymaganych wiadomości

Zasada działania czujników termorezystancyjnych i termoelektrycznych, metody i układy pomiarowe. Zasada pomiaru energii cieplnej. Interfejs szeregowy RS-232C. Tryb przesyłania danych. Organizacja i właściwości interfejsu RS485. Protokół Modbus.

Literatura

- [1] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, Warszawa, 2002.
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [4] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski. *Termometria*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1998.
- [5] W. Mielczarek. *Szeregowe interfejsy cyfrowe*. Helion, Gliwice, 1993.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Konfigurowanie funkcji pomiarowych i parametrów transmisji przyrządów pomiarowych N12T

Ustawienia funkcji pomiarowych mierników N12T

- pierwszy miernik nastawić w trybie do współpracy z termorezystorem Pt100 z ręczną kompensacją rezystancji krótkich przewodów czujnika o wartości 0,2 Ω (metoda dwuprzewodowa pomiaru),
- drugi miernik nastawić w trybie do współpracy z termoelementem typu J, z automatyczną kompensacją temperatury wolnych końców.

Ustawienia parametrów transmisji interfejsu RS485

- **adresy mierników (Adr):** 1 dla miernika pierwszego, i 2 dla miernika drugiego (dostępny zakres 1...247),
- **prędkość transmisji (bAud):** 9600 bit/s (dostępne prędkości 2400, 4800 i 9600 bit/s),
- **tryb pracy i rodzaj jednostki informacyjnej (trYb): r8n2**
dostępne tryby: ASCII i RTU,
dostępne jednostki informacyjne: ASCII: 8N1, 7E1, 7O1
RTU: 8N2, 8E1, 8O1

Ustawiony tryb pracy **r8n2** oznacza: tryb RTU, 8 bitów danych, brak bitu kontroli parzystości, 2 bity stopu. Dla innych typów jednostek, Even oznacza nieparzysty bit kontroli parzystości, Odd odpowiednio parzysty bit kontroli.

Podstawowe informacje przydatne przy wykonywaniu w/w zadań znajdują się poniżej w Tab. 1, pozostałe informacje znajdują się w szczegółowej instrukcji mierników serii N12 (w załączeniu na stanowisku laboratoryjnym).

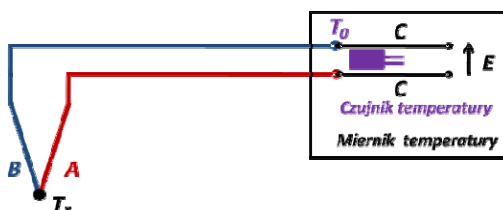
Tabela 1
Schemat matrycy trybu programowania przyrządu N12T

1	InP Parametry wejścia	tyP Typ wejścia	Con Rodzaj Compens.	d_P Punkt dziesiętny	Cnt Liczba pomiarowa	Ind Indywid. charakt.	H1	Y1	H2	Y2
2	Alr1 Alarm 1	PrL1 Dolny próg	Prh1 Górny próg	TYP1 Typ alarmu	dLY1 Opóźnienie alarmu	Led1 Podtrz. Sygn.	---			
3	Alr2 Alarm 2	PrL2 Dolny Próg	Prh2 Górny próg	TYP2 Typ alarmu	DLY2 Opóźnienie alarmu	Led2 Podtrz. Sygn.	---			
4	Out Wyjście	TYPa Wyjście (Nap/prąd)	AnL Dolny próg wyj. analog.	AnH Górny próg wyj. analog.	bAud Prędkość transmisji	trYb Rodzaj transm.	Adr. Adr. urz.	---		
5	SEr Serwis	SEt Wpis param. standard.	SEC Wprow. hasła	tSt Test Wświel.	JEd Podśw. Jedn.	---				

Ad 2. Pomiary temperatury z wykorzystaniem przemysłowego miernika typu N12T

Ad 2a. Pomiar temperatury za pomocą termoelementu typu J

Do pomiarów stosujemy miernik N12T (oznaczony cyfrą 2), do którego na stałe przyłączono termoelement typu J. Na rys. 1 pokazano schemat podłączenia czujnika.



Rys. 1. Układ połączenia termopary z miernikiem N12T.

Mierniki temperatury przeznaczone do współpracy z termoelementami mają wbudowany układ pomiaru temperatury listwy połączeniowej miernika i możliwość kompensacji wpływu tej temperatury na wynik pomiaru. Podłączenie przewodów termoelementu lub przewodów kompensacyjnych do listwy połączeniowej miernika powoduje powstanie w tym miejscu spoin odniesienia.

Na stanowisku czujnik jest na stałe podłączony do miernika, należy tylko właściwie skonfigurować programowo miernik. Wykonuje się to w następujący sposób:

- W trybie programowania wybrać pozycję **InP** (ustawienia parametrów wejścia), a następnie przejść do parametru **tYP** (typ wejścia) i ustawić jego wartość na **tE-J** (ustalenie typu czujnika temperatury – termopara typu J), w sposób podany w instrukcji programowania miernika N12T.
- Przechodzimy do parametru **Con** (rodzaj kompensacji) i ustawiamy jego wartość tak, aby **nie zawierała** się w zakresie 0 do 60°C (włączona zostanie w ten sposób kompensacja automatyczna temperatury wolnych końców) i wracamy do trybu pomiaru.

Wykonujemy pomiar temperatury T_x wody w termosach (woda gorąca i woda o temp. pokojowej) za pomocą termopary, przy czym równocześnie wykonujemy pomiar temperatury T_w wody wzorcowym termometrem odniesienia (termorezystor Pt100 podłączony do miernika N12T oznaczonego cyfrą 1). Wyznaczamy wartości błędów bezwzględnych pomiarów Δt wg zależności:

$$\Delta T = T_x - T_w \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

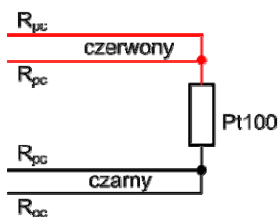
W niektórych układach do pomiaru temperatury stosuje się stabilizację temperatury spoin odniesienia w termostacie (przypadek, gdy spoina odniesienia znajduje się poza miernikiem). Wówczas zamiast wykorzystania automatycznej kompensacji temperatury listwy ze złączem odniesienia, można zaprogramować wartość stabilizowanej temperatury. W przypadku, gdy faktyczna wartość temperatury złącza odniesienia będzie inna niż zaprogramowana, ten tryb pracy spowoduje błędne wskazania miernika.

W celu zbadania tego zjawiska przeprowadzić eksperyment. Zaprogramować temperaturę odniesienia o wartości 0 °C. Wykonać pomiar temperatury wody w termosach za po-

mocą termopary i termometru wzorcowego. Wyznaczyć różnicę wskazań zgodnie z (1). Wykorzystując wyznaczoną różnicę wskazań zaprogramować w mierniku wartość temperatury wolnych końców tak, aby obydwa mierniki wskazywały ten sam wynik pomiaru.

Ad 2b. Pomiar temperatury czujnikiem rezystancyjnym Pt100

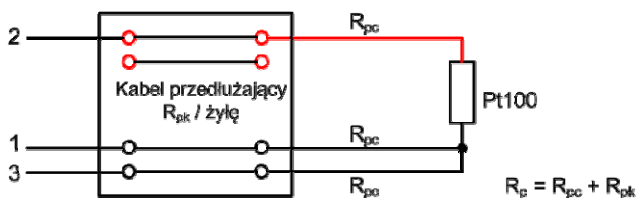
Do pomiarów stosujemy dodatkowy termorezystancyjny czujnik Pt100 w 4-przewodowym układzie wyprowadzeń (rys. 2) oraz przemysłowy miernik N12T o numerze 2 z wyprowadzonymi na płytę czołową zaciskami laboratoryjnymi.



Rys. 2. Układ połączeń termorezystora Pt100. R_{pc} – rezystancja 1 żyły przewodu.

Metoda trójprzewodowa

Mierniki temperatury przeznaczone do współpracy z termorezystorami mają możliwość kompensacji wpływu rezystancji przewodów doprowadzających. Przy założeniu identyczności przewodów kompensacja jest możliwa, gdy zastosujemy połączenie trójprzewodowe. Podłączyć termorezystor do miernika N12T wg rys. 3 wykorzystując dodatkowy przewód łączący (opcja zwiększenia odległości czujnika od miernika).



Rys. 3. Układ połączeń czujnika Pt100 z zaciskami N12T poprzez kabel przedłużający.

Wykonujemy operację przeprogramowania miernika dla czujnika Pt100.

- W trybie programowania wybrać pozycję **InP** (ustawienia parametrów wejścia), a następnie przejść do parametru **tYP** (typ wejścia) i ustawić jego wartość na **Pt1** (ustalenie typu czujnika temperatury – termorezystor Pt100),
- Przechodzimy do parametru **Con** (rodzaj kompensacji) i ustawiamy jego wartość tak, aby **nie zawierała** się w zakresie 0 do 60 °C (włączona zostanie w ten sposób kompensacja automatyczna rezystancji przewodów) i wracamy do trybu pomiaru.

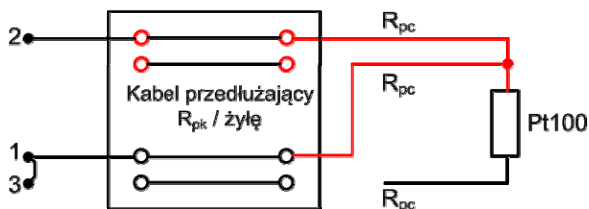
Wykonujemy pomiar temperatury T_x wody w termosach (woda gorąca i woda o temp. pokojowej) za pomocą termorezystora, przy czym równocześnie wykonujemy pomiar tempe-

ratury T_w wody wzorcowym termometrem odniesienia (termorezystor odniesienia Pt100 podłączony do miernika N12T o numerze 1). Wyznaczamy wartości błędów zgodnie z (1).

Metoda dwuprzewodowa

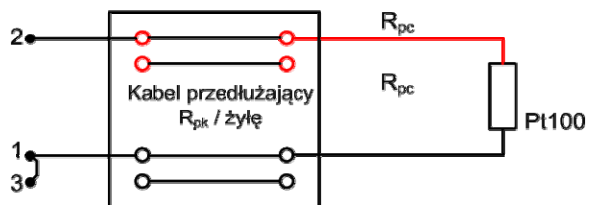
W metodzie tej konieczna jest znajomość rezystancji przewodów łączących czujnik z miernikiem. Można zmierzyć ją miernikiem N12T, wykorzystując tryb pomiaru rezystancji. W tym celu należy:

- połączyć przewody termorezystora do miernika N12T wg rys. 4;
- w trybie programowania wybrać pozycję **InP** (ustawienia parametrów wejścia), a następnie przejść do parametru **tYP** (typ wejścia) i ustawić jego wartość na **rEZL** (pomiar rezystancji do 400 Ω).
- przechodzimy do parametru **Con** (rodzaj kompensacji), ustawiamy jego wartość na 0 Ω , wracamy do trybu pomiaru i odczytujemy wynik jako $2R_p$ (ewentualnie poprawić parametr **d_P** (DEC.POIN) w celu zwiększenia liczby cyfr znaczących wyniku).



Rys. 4. Połączenie do pomiaru rezystancji przewodów miernikiem N12T.

W celu przeprowadzenia pomiarów temperatury w układzie dwuprzewodowym należy połączyć czujnik z miernikiem N12T poprzez kabel przedłużający zgodnie z rys. 5. W trybie programowania należy powrócić do ustawienia typu czujnika Pt100, a w pozycji kompensacja (parametr **Con**) ustawiamy wartość liczbową równą $2R_p$ w Ω .



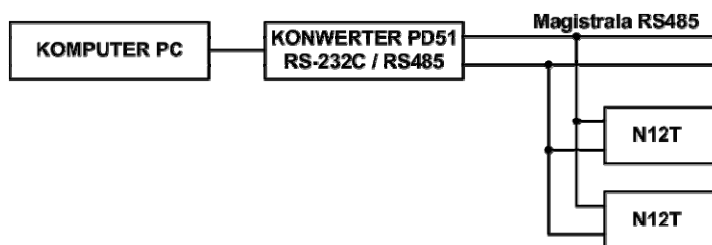
Rys. 5. Dwuprzewodowe połączenie termorezystora z miernikiem N12T.

Wykonujemy pomiar temperatury T_x wody w termosach (woda gorąca i woda o temp. pokojowej) za pomocą termorezystora, przy czym równocześnie wykonujemy pomiar temperatury T_w wody wzorcowym termometrem odniesienia (termorezystor odniesienia Pt100 podłączony do miernika N12T o numerze 1). Wyznaczamy wartości błędów zgodnie z (1).

Ad 3. Konfiguracja mierników i pomiar temperatur z wykorzystaniem interfejsu RS485

System pomiarowy (rys. 6) składa się z dwóch przyrządów N12T, których przeznaczenie i parametry metrologiczne omówiono w rozdz. 1 i 2. Każdy z przyrządów współpracuje z jednym czujnikiem temperatury (termorezystor Pt100 i termopara typu J). Przyrządy są podłączone do magistrali interfejsu szeregowego RS485, która łączona jest z wejściem interfejsu szeregowego RS-232C komputera poprzez konwerter RS232/485 typu PD51.

Do komunikacji z przyrządami N12T wykorzystywane jest w ćwiczeniu oprogramowanie *Lumel Ciepło*. Skonfigurowano w nim dwa węzły: W1 i W2, przypisane do jednego portu RS232 do komunikacji z jedną magistralą RS485. W celu nawiązania komunikacji niezbędne jest ustalenie prędkości transmisji oraz protokołu wymiany danych. Dzięki wbudowanemu w program *Lumel Ciepło* interfejsowi *DDE* możliwe jest udostępnienie wyników pomiarów innym programom w środowisku *Windows MS*, przy czym aktywacja procesu udostępniania danych pomiarowych przez interfejs *DDE* następuje automatycznie po włączeniu akwizycji danych w programie.



Rys. 6. Schemat systemu pomiarowego z 2 przyrządami N12T w sieci RS 485.

Do odbioru danych zastosowano program DASYLab, który umożliwia odczytanie danych wystawianych przez *DDE* oraz posiada bogatą bibliotekę matematyczną, procedury wizualizacji i archiwizacji danych. Do akwizycji danych służy moduł *DDE Input* umieszczony w sekcji interfejsów (*Input/Output*). Konfiguracja modułu *DDE Input* polega na:

- podaniu nazwy aplikacji, z której odczytywane będą dane, w przypadku połączenia z programem *Lumel Ciepło* - jest to aplikacja "*Config*",
- określenie "tematu" rozmowy (*Topic*) - w tym przypadku "*Dane*",
- określeniu "ścieżki dostępu" do zmiennej, która ma być odczytana.

W prezentowanym przykładzie ścieżka ma postać "W1.N12T_1.Curr" i składa się z trzech części rozdzielonych kropkami. Pierwsza określa węzeł W1 (dla drugiego miernika W2), następnie definiowany jest przyrząd pomiarowy, w tym przypadku jest to miernik N12T o adresie nr 1 (2), na końcu znajduje się nazwa mierzonej wielkości, w tym przypadku bieżąca wartość wyświetlana przez miernik.

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym,
2. Oprogramowanie *DASYLab*,
3. Oprogramowanie Lumel Ciepło 3.5.4 firmy Lumel,
4. Mierniki typu N12T firmy Lumel 2 szt.,
5. Termorezystor podłączony na stałe do "1" N12T,
6. Termopara typu J podłączona na stałe do "2" N12T,
7. Termorezystor Pt100 (wyprowadzenia 4-przewodowe) 1 szt.,
8. Konwerter PD51 (RS232C/RS485) firmy Lumel 1szt.,
9. Symulator długiego kabla przyłączeniowego.

Ćwiczenie 4

Pomiary przyśpieszeń w ruchu drgającym

Program ćwiczenia

1. Budowa i konfigurowanie toru do pomiaru przyśpieszenia na bazie tensometrycznego czujnika przyśpieszenia typu BWH - skalowanie czujnika w oparciu o przyśpieszenie ziemskie.
2. Budowa i konfigurowanie toru pomiarowego do pomiaru przyśpieszenia na bazie zintegrowanych, pojemnościowych czujników przyśpieszenia typu - skalowanie czujnika w osiach x, y, z w oparciu o przyśpieszenie ziemskie.
3. Opracowanie systemu pomiarowego w środowisku DasyLab,
4. Rejestracja sygnałów drgań silnika oraz wyznaczenie i analiza widma sygnałów w środowisku DasyLab.

Zakres wymaganych wiadomości

Teoria przetwornika sejsmicznego, budowa i zasada działania czujników przyśpieszenia. Akcelerometry piezoelektryczne. Analiza FFT sygnałów.

Literatura

- [1] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] B. Szumielewicz, B. Słomski, W. Styburski. *Pomiary elektroniczne w technice*. WNT Warszawa, 1982.
- [4] Materiały katalogowe firmy Analog Devices (<http://www.analog.com>).
- [5] Instrukcja obsługi MVD2555. Biuro inżynierskie Zajązkowski, Poznań.
- [6] Operating Manual MVD2555. HBM GmbH Darmstadt (<http://www.hbm.de>).
- [7] Operating Manual Catman@Express4.5. HBM GmbH Darmstadt.
- [8] DASYLab 9.0 *User Guide* (<http://www.dasylab.net>).

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Budowa i konfigurowanie toru do pomiaru przyśpieszenia na bazie tensometrycznego czujnika przyśpieszenia typu BWH - skalowanie czujnika w oparciu o przyśpieszenie ziemskie

Tensometryczny czujnik przyśpieszenia typu BWH zawiera przetwornik z masą sejsmiczną i przetwarza mierzone przyspieszenie bezwzględne na przemieszczenie względne masy sejsmicznej względem obudowy czujnika. Przetwornik sejsmiczny zbudowany jest na bazie belki giętej, jednostronnie mocowanej do obudowy, obciążonej masą sejsmiczną. Pod wpływem przyłożonego przyspieszenia odkształceniu ulega belka z naklejonymi wzdłużnie tensometrami piezorezystywnymi. Właściwą wartość tłumienia zapewnia olej wiskotyczny wypełniający wnętrze czujnika. Powstałe odkształcenie przetwarzane jest na sygnał napięciowy za pomocą układu tensometrów umieszczonych na ramieniu belki i połączonych w układzie pół-mostka.

Czujnik połączony jest ze wzmacniaczem MVD2555. Wzmacniacz należy skonfigurować ustawiając następujące parametry:

<i>Input</i> (zakres czułości)	0,2mV/V ÷ 4 mV/V,
<i>Excitation</i> (amplituda napięcia zasilającego U_S)	2,5V,
<i>Transducer</i> (typ czujnika)	half bridge (pół-mostek),
<i>Unit</i> (jednostka)	mV/V.

W takiej konfiguracji parametru "Unit" wzmacniacz mierzy względną zmianę napięcia nierównowagi z maksymalną rozdzielczością. Umożliwia pomiarowe wyznaczenie czułości czujnika przyśpieszenia, którą zdefiniowano jako stosunek względnej zmiany napięcia nierównowagi mostka ($\Delta U_0 / U_S$) do przyśpieszenia a :

$$S_{CZ} = \frac{\frac{\Delta U_0}{U_S}}{a} \quad (1)$$

Ustawiamy czujnik w położeniu poziomym tak, aby działało na niego przyśpieszenie ziemskie $+g$ i równoważymy wzmacniacz poprzez naciśnięcie klawisza $>0<$ na panelu przednim. Po obróceniu czujnika o 180° na czujnik działa przyśpieszenie $-g$ i odczytujemy odpowiadającą zmianę przyśpieszenia o $2g$ wartość napięcia nierównowagi $(\Delta U_0 / U_S)_{WZ}$. Czułość czujnika wyznaczamy z zależności:

$$S_{CZ} = \frac{\left(\frac{\Delta U_0}{U_S} \right)_{WZ}}{2g} \quad (2)$$

Dalsze skalowanie toru pomiarowego przeprowadzamy w oparciu o wzór:

$$S = S_{CZ} \cdot S_W \quad (3)$$

gdzie: S – czułość całkowita toru pomiarowego, S_{CZ} – czułość czujnika, a

S_W – czułość wzmacniacza, podana jest zależnością:

$$S_W = M_{skal} \cdot \frac{a_{skal}}{\left(\frac{\Delta U_0}{U_S}\right)_{skal}} \quad (4)$$

gdzie:

- M_{skal} – mnożnik skali (określa liczbę miejsc wyniku po przecinku – we wzmacniaczu **decimal point**),
- a_{skal} – wartość nominalna wielkości mierzonej (we wzmacniaczu **nominal value**),
- $(\Delta U_0 / U_S)_{skal}$ – nominalna wartość wielkości wejściowej wzmacniacza (we wzmacniaczu **measuring range lub range**).

Po podstawieniu (1) i (4) do wzoru (3) otrzymujemy:

$$S = S_{CZ} \cdot M_{skal} \cdot \frac{a_{skal}}{\left(\frac{\Delta U_0}{U_S}\right)_{skal}} \quad (5)$$

przy czym równocześnie iloczyn $M_{skal} \cdot a_{skal}$ określa zakres pomiarowy wielkości mierzonej (wynika to z zasady pomiaru realizowanej przez wzmacniacz).

Następnie, wykorzystując wyliczoną wartość czułości czujnika przyspieszenia, na podstawie zależności (5) dobieramy nastawy wzmacniacza MVD2555 M_{skal} , a_{skal} i $(\Delta U_0 / U_S)_{skal}$ tak, aby:

- czułość całkowita $S=1$, wówczas miernik pokazuje wartość liczbowo równą mierzonej wartości przyspieszenia,
- wartość iloczynu $M_{skal} a_{skal}$ (będąca zakresem pomiarowym), odpowiadała dopuszczalnemu zakresowi wielkości mierzonych (przyjąć zakres $\pm 5g$).

Uwaga:

Wpisanie wyznaczonych wartości parametrów skalujących do wzmacniacza wymaga wprowadzenia w pierwszej kolejności właściwej jednostki (parametr UNIT).

Wzmacniacz skaluje równocześnie analogowy sygnał wyjściowy, przy czym wartość napięcia $U = 10 \text{ V}$ odpowiada przyjętej, zakresowej wartości wielkości mierzonej. *Napięciowy sygnał wyjściowy wzmacniacza podłączony jest do kanału "0" karty pomiarowej.*

Ad 2. Budowa i konfigurowanie toru pomiarowego do pomiaru przyspieszenia na bazie zintegrowanych, pojemnościowych czujników przyspieszenia typu ADXL320EB - skalowanie czujnika w osiach x, y, z w oparciu o przyspieszenie ziemskie

Zintegrowany, pojemnościowy czujnik przyspieszenia serii ADXL również zawiera przetwornik z masą sejsmiczną i przetwarza mierzone przyspieszenie bezwzględne na przemieszczenie względne masy sejsmicznej względem obudowy czujnika [1,4]. Przemieszczenie masy sejsmicznej przetwarzane jest na elektryczny sygnał napięciowy z zastosowaniem różnicowego przetwornika pojemnościowego. Czujnik ADXL320EB pracuje

w trybie ratiometric (czujnik stosunkowy), stąd jego napięcie wyjściowe U zależy również od wartości napięcia zasilania U_S . Czulość czujnika w każdej osi definiujemy zatem jako stosunek napięcia wyjściowego U do zasilającego U_S wywołanego przyspieszeniem a :

$$S_{CZ} = \frac{U}{U_S} \quad (6)$$

Zakres dopuszczalnych wartości napięcia zasilającego czujnik wynosi $2,4 \text{ V} \div 5,5 \text{ V}$. Typowe wartości to 3 V lub 5 V . Na stanowisku nominalna wartość napięcia zasilającego wynosi 5 V . Zgodnie z danymi katalogowymi przy takim napięciu zasilania nominalna wartość napięcia wyjściowego wynosi $U_N = 312 \text{ mV/g}$. Stąd czulość nominalna czujnika wynosi:

$$S_{CZ,N} = \frac{\left(\frac{U}{U_S}\right)_N}{a} = \frac{312 \text{ mV}}{5 \text{ V}} = 62,4 \frac{\text{mV}}{\text{g}} \quad (7)$$

Czujnik realizuje liniową funkcję przetwarzania, którą możemy zapisać:

$$\left(\frac{U}{U_S}\right) = \left(\frac{U}{U_S}\right)_{\text{off}} + S_{CZ} \cdot a \quad (8)$$

gdzie wartość napięcia offsetu (tzw. "zero" czujnika) odpowiada połowie napięcia zasilającego. Stąd nominalna wartość offsetu stosunku napięć, niezależnie od wartości napięcia zasilającego wynosi:

$$\left(\frac{U}{U_S}\right)_{\text{off},N} = \frac{1}{2} \quad (9)$$

Na podstawie (8) wartość przyspieszenia określa zależność:

$$a = \frac{\left(\frac{U}{U_S}\right) - \left(\frac{U}{U_S}\right)_{\text{off}}}{S_{CZ}} \quad (10)$$

W zależności (10) można przyjąć nominalne wartości czulości (7) oraz offsetu (9), można jednakże przeprowadzić skalowanie w oparciu o przyspieszenie ziemskie i wyznaczyć aktualne, indywidualne wartości tych parametrów dla każdego czujnika.

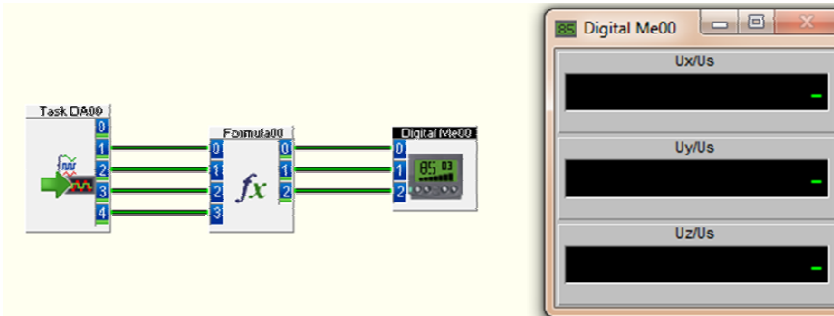
Zbudowany na bazie 2 dwuosiowych czujników ADXL320EB czujnik trójosiowy zawiera 2 układy ADXL320EB zamocowane względem siebie na wzajemnie prostopadłych, sąsiednich ściankach stalowej kostki sześcienniej. Wykorzystano 3 z 4 czujników, które tworzą "trójkę prawoskrętną" układu współrzędnych xyz . W celu przeprowadzenia skalowania i wyznaczenia indywidualnych współczynników skalowania dla każdego czujnika należy przygotować oprogramowanie układu akwizycji w środowisku DasyLab.

Skalowanie czujnika przeprowadzamy w każdej osi oddzielnie w podobny sposób, jak w przypadku czujnika tensometrycznego (rozdz. 1). Trzy napięcia wyjściowe czujnika, odpowiadające 3 osiom pomiarowym U_X , U_Y , U_Z doprowadzone są do kanałów "1", "2" i "3" karty pomiarowej (rys. 1). Do kanału "4" doprowadzono napięcie zasilające U_S . W module *Formuła* przeprowadzana jest operacja dzielenia napięć wyjściowych czujników przez ich napięcie zasilania.

Ustawiamy czujnik trójosiowy w położeniu neutralnym tak, aby w czynnych osiach pierwszego czujnika ADXL320EB nie działało przyspieszenie ziemskie. Odczytujemy wartości offsetu czujników $(U/U_s)_{off}$. Następnie ustawiamy czujnik w ten sposób, aby przyspieszenie ziemskie działało zgodnie z kierunkiem wybranej osi, a następnie w przeciwnym kierunku. Czułość czujnika wyznaczamy z zależności:

$$S_{CZ} = \frac{\left(\frac{U}{U_s}\right)_{+g} - \left(\frac{U}{U_s}\right)_{-g}}{2g} \quad (11)$$

Podobnie postępujemy z kolejnymi osiami obydwu czujników.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do skalowania czujników ADXL320EB.

Ad 3. Opracowanie systemu pomiarowego w środowisku DASYLab

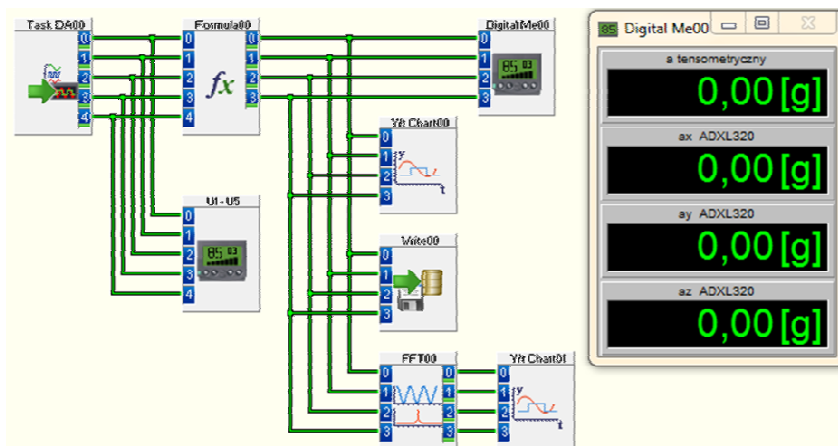
W celu budowy systemu wykorzystywane są następujące moduły programu DASYLab:

- akwizycji napięć w kanałach *Task DA* (*Analog Input z Modules/Inputs/Outputs/NI-DAQmx*),
- obliczeń matematycznych *Formula* (*Formula Interpreter z Modules/Mathematics*),
- wizualizacji numerycznej mierzonych wielkości *Digital Meter* (*Digital Meter z Modules/Display*),
- obserwacji rejestrowanych danych w czasie *Y/t Chart* (*Y/t Chart z Modules/Display*),
- zapisu danych do pliku na dysk *Write* (*Write Data z Modules/Files*),
- obliczanie transformacji *FFT* (*FFT z Modules/Signal analysis*).

Każdy z modułów (rys. 2) wymaga konfiguracji poprzez wybranie polecenia *Properties* z menu kontekstowego obiektu.

Cztery formuły skalujące w programie wyznaczają wartości mierzonych przyspieszeń zgodnie z funkcjami skalującymi (10) dla 3 osi czujników ADXL320EB, oraz zgodnie z rozdz. 1, funkcja skalująca dla czujnika tensometrycznego ma postać:

$$a = \frac{U}{10V} = \frac{1}{2} \cdot U \quad (12)$$



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego przyspieszeń.

Ad 4. Rejestracja sygnałów drgań silnika oraz wyznaczenie i analiza widma sygnałów w środowisku DASYLab

Po wyskalowaniu torów pomiarowych przyspieszeń, montujemy czujniki poziomo na korpusie silnika. Po uruchomieniu silnika włączamy układ rejestracji sygnałów przyspieszeń w dziedzinie czasu i wyznaczania ich widma *FFT*. Przeprowadzamy fizyczną interpretację zarejestrowanych sygnałów, oraz analizę widma, próbując określić na jego podstawie prędkość obrotową silnika.

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym,
2. Karta pomiarowa NI6221 wraz z płytką łączeniową,
3. Oprogramowanie DASYLab wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
4. Wzmacniacz pomiarowy MVD 2555,
5. Akcelerometr tensometryczny typu BWB,
6. Zintegrowany pojemnościowy akcelerometr 3-osiowy na bazie ADXL320EB,
7. Zasilacz stabilizowany +5 V do akcelerometru ADXL320EB.

Ćwiczenie 5

Projekt i realizacja tensometrycznych przetworników pomiarowych siły i masy z wykorzystaniem belki giętej i przemysłowego panelu wzmacniacza tensometrycznego MVD2555

Program ćwiczenia

1. Pomiar masy lub siły metodą mostka niezrównoważonego,
 - a. konfiguracja półmostka z tensometrami wzdłużnymi,
 - b. konfiguracja półmostka z tensometrem wzdłużnym i poprzecznym,
 - c. konfiguracja pełnego mostka z tensometrami wzdłużnymi i poprzecznymi.
2. Skalowanie torów pomiarowych w oparciu o obliczone teoretycznie czułości.
3. Skalowanie torów pomiarowych w oparciu o wzorzec masy - porównanie ze skalowaniem teoretycznym.
4. Konfigurowanie torów pomiarowych w oparciu o oprogramowanie Catman® Express.
5. Badanie wpływu rezystancji kabla na błędy pomiaru w torze pomiarowym.
6. Zapis przebiegów dynamicznych w torze pomiarowym za pomocą karty pomiarowej.

Zakres wymaganych wiadomości

Wzmacniacz z przetwarzaniem pracujący na zasadzie modulacji amplitudy. Zasada działania i właściwości tensometrów. Metody skalowania. Właściwości mostka stałego i zmiennie-prądowego zrównoważonego i niezrównoważonego. Analiza mechanicznych właściwości belki giętej. Wyznaczanie stopnia tłumienia oraz częstotliwości drgań obiektu oscylacyjnego II rzędu na podstawie odpowiedzi na skok jednostkowy.

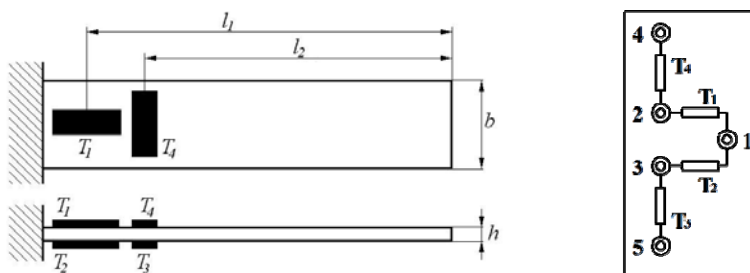
Literatura

- [1] M. Miłek: *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [2] S. Tumański: *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] B. Szumielewicz, B. Słomski, W. Styburski: *Pomiary elektroniczne w technice*. WNT Warszawa, 1982.
- [4] Instrukcja obsługi MVD2555. Biuro inżynierskie Zajączkowski, Poznań.
- [5] Operating Manual MVD2555. HBM GmbH Darmstadt (<http://www.hbm.de>).
- [6] Operating Manual Catman®Express4.5. HBM GmbH Darmstadt.
- [7] DASYLab 9.0 *User Guide* (<http://www.dasylab.net>).

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Pomiar masy lub siły metodą mostka niezrównoważonego

Na rys. 1 przedstawiono schemat budowy czujnika do pomiarów masy lub siły z wykorzystaniem belki giętej jako przetwornika sprężystego oraz schemat wyprowadzeń końcówek czujników tensometrycznych.



Rys. 1. Schemat budowy przetwornika masy i siły oraz układ wyprowadzeń.

Do współpracy z mostkiem niezrównoważonym wykorzystano przemysłowy panel wzmacniacza tensometrycznego MVD2555. Opracowano 3 możliwości konfiguracji mostka z wykorzystaniem czujników tensometrycznych, dla różnej ich liczby i różnych konfiguracji czujników. Czułość tak skonstruowanych czujników zdefiniowano jako stosunek względnej zmiany napięcia nierównowagi mostka ($\Delta U_0/U_Z$) do masy m :

$$S_{CZ} = \frac{\Delta U_0}{U_Z} \cdot m \quad (1)$$

Wymiary i stałe materiałowe czujnika: stała tensometrów $k = 1,97$, $b = 0,0193$ m, $l_1 = 0,117$ m, $l_2 = 0,112$ m, $h = 0,99 \cdot 10^{-3}$ m, moduł Younga $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ N/m², liczba Poissona $\nu = 0,3$.

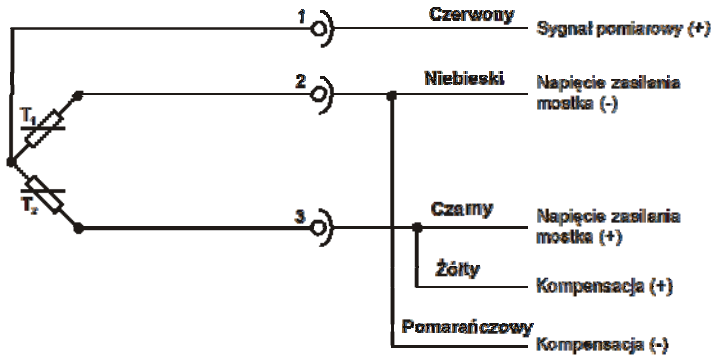
Ad 1a. Konfiguracja półmostka z tensometrami wzdlużnymi

Korzystając z definicji czułości (1) oraz z praw mechaniki można wyprowadzić zależność na czułość czujnika masy:

$$S_{CZ} = \frac{\Delta U_0}{U_Z} \cdot m = \frac{3 \cdot k \cdot g \cdot l_1}{E \cdot b \cdot h^2} \cdot m \quad (2)$$

Podstawiając do (2) odpowiednie dane liczbowe uzyskujemy wartość czułości czujnika, którą należy wyrazić w jednostkach [mV/V/kg].

Sposób połączenia mostka ze wzmacniaczem pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat połączenia układu półmostka z 2 tensometrami wzdłużnymi ze wzmacniaczem.

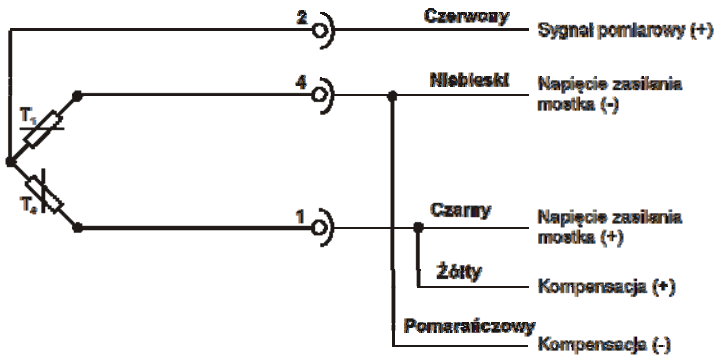
Ad 1b. Konfiguracja półmostka z tensometrem wzdłużnym i poprzecznym

Korzystając z definicji czułości (1) oraz z praw mechaniki można wyprowadzić zależność na czułość czujnika masy:

$$S_{cz} = \frac{3 \cdot k \cdot g \cdot (l_1 + \nu \cdot l_2)}{2 \cdot E \cdot b \cdot h^2} \quad (3)$$

Podstawiając do (3) odpowiednie dane liczbowe uzyskujemy wartość czułości czujnika, którą należy wyrazić w jednostkach [mV/V/kg].

Sposób połączenia mostka ze wzmacniaczem pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Schemat połączenia układu półmostka z tensometrami wzdłużnym i poprzecznym ze wzmacniaczem.

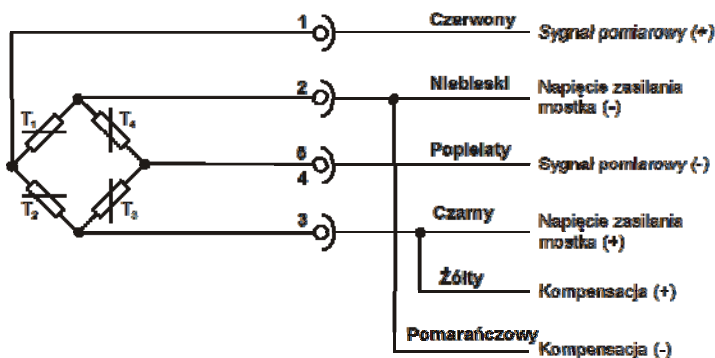
Ad 1c. Konfiguracja pełnego mostka z tensometrami wzdluznymi i poprzecznymi

Korzystając z definicji czulości (1) oraz z praw mechaniki można wyprowadzić zależność na czulość czujnika masy:

$$S_{CZ} = \frac{3 \cdot k \cdot g \cdot (l_1 + \nu \cdot l_2)}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (4)$$

Podstawiając do (4) odpowiednie dane liczbowe uzyskujemy wartość czulości czujnika, którą należy wyrazić w jednostkach [mV/V/kg].

Sposób połączenia mostka ze wzmacniaczem pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat połączenia układu pełnego mostka ze wzmacniaczem.

Ad 2. Skalowanie torów pomiarowych w oparciu o obliczone teoretycznie czulości

Skalowanie toru pomiarowego przeprowadzamy w oparciu o wzór:

$$S = S_{CZ} \cdot S_W \quad (5)$$

gdzie: S – czulość całkowita toru pomiarowego, S_{CZ} – czulość czujnika, S_W – czulość wzmacniacza, podana jest zależnością:

$$S_W = M_{skal} \cdot \frac{\alpha_{skal}}{\left(\frac{\Delta U_0}{U_Z}\right)_{skal}} \quad (6)$$

gdzie:

- M_{skal} – mnożnik skali (określa liczbę miejsc wyniku po przecinku – we wzmacniaczu **decimal point**),
- α_{skal} – wartość nominalna wielkości mierzonej (we wzmacniaczu **nominal value**),
- $(\Delta U_0 / U_Z)_{skal}$ – nominalna wartość wielkości wejściowej wzmacniacza (we wzmacniaczu **measuring range lub range**).

Po podstawieniu (1) i (6) do zależności (5) otrzymujemy:

$$S = S_{CZ} \cdot M_{skal} \cdot \frac{\alpha_{skal}}{\left(\frac{\Delta U_0}{U_Z}\right)_{skal}} \quad (7)$$

przy czym równocześnie iloczyn $M_{skal} \cdot \alpha_{skal}$ określa zakres pomiarowy wielkości mierzonej (wynika to z zasady pomiaru realizowanej przez wzmacniacz).

Następnie wykorzystując wyliczoną wartość czułości czujnika masy na podstawie zależności (7) dobieramy nastawy wzmacniacza MVD2555: M_{skal} , α_{skal} i $(\Delta U_0 / U_Z)_{skal}$ tak, aby:

- czułość całkowita $S = 1$, wówczas miernik pokazuje wartość liczbowo równą mierzonej masie,
- wartość iloczynu $M_{skal} \cdot \alpha_{skal}$ (będąca zakresem pomiarowym), odpowiadała dopuszczalnemu zakresowi wielkości mierzonych (przyjąć zakres np. 200 g).

Wzmacniacz skaluje równocześnie analogowy sygnał wyjściowy, przy czym wartość napięcia $U = 10$ V odpowiada przyjętej, zakresowej wartości wielkości mierzonej.

Ad 3. Skalowanie torów pomiarowych w oparciu o wzorzec masy - porównanie ze skalowaniem teoretycznym

W tym punkcie ćwiczenia należy porównać wyniki czułości czujnika wyliczone w rozdz. 1 z czułościami wyznaczonymi na drodze kalibracji masą wzorcową:

$$S_{CZ} = \frac{\left(\frac{\Delta U}{U_Z}\right)_{WZ}}{m_{WZ}} \quad (8)$$

gdzie: m_{WZ} – jest znaną masą wzorcową,

$(\Delta U_0 / U_Z)_{WZ}$ – odpowiada wartości rozrównoważenia mostka dla wzorcowej masy.

Zależność $(\Delta U_0 / U_Z)_{WZ}$ odczytujemy z wyświetlacza wzmacniacza ustawiając w grupie CALIBRATION w pozycji UNIT jednostkę [mV/V]. W tym trybie wyświetlany jest stosunek napięcia niezrównoważenia mostka do wartości napięcia zasilania. Powrót do trybu skalowania wymaga wprowadzenia w pierwszej kolejności jednostki UNIT.

Ad 4. Konfigurowanie torów pomiarowych w oparciu o oprogramowanie Catman® Express

Dużo prostsza jest obsługa i kalibrowanie torów pomiarowych z wykorzystaniem oprogramowania *Catman®Express* umożliwiającego sterowanie wzmacniaczem poprzez interfejs RS-232C. Na rysunku 5. pokazano okno "Setup device", które zawiera wszystkie niezbędne funkcje do skonfigurowania toru pomiarowego i do przeprowadzenia pomiaru. Dla pomiarów bardziej złożonych można wykorzystać inne funkcje programu "Catman".



Rys. 5. Okno „Setup device” programu Catman

Konfiguracji urządzenia dokonujemy poprzez „Setup device” (rys. 5). W oknie tym mamy możliwość wyboru: typu przetwornika, jego napięcia zasilania, rodzaju i częstotliwości granicznej filtra dolnoprzepustowego (w oknie „Transducer adaptation”), oraz kalibracji wzmacniacza (w oknie „Indication adaptacion”). Dodatkowa funkcja „Calibration point” umożliwia przeprowadzenie kalibracji w oparciu o wzorec w sposób dużo prostszy, niż omówiony w rozdz. 2. Po zrównoważeniu toru pomiarowego (naciśnięcie klawisza >0<) zadajemy znaną, wzorcową wielkość nieelektryczną (w przypadku ćwiczenia będzie to ciężarek o znanej masie), wpisujemy jej wartość w oknie „calibration point” i naciskamy klawisz „Measure”. W oknie „Meas. Range” można odczytać wartość napięcia nierównowagi mostka odpowiadającą zadanej, wzorcowej wartości masy.

Ad 5. Badanie wpływu rezystancji kabla na błędy pomiaru w torze pomiarowym

Łączymy kolejno układy zgodnie z rysunkami 2 – 4, nastawiamy parametry we wzmacniaczu i przeprowadzamy skalowanie masą wzorcową (w poz. przełączników kabel krótki, 5 lub 6 przewodów). Należy dokonać porównania dokładności pomiaru dla połączenia 3 i 5 przewodowego dla układów półmostkowych oraz 4 i 6 przewodowego dla układu pełnego mostka. Symulacji długiego kabla dokonujemy za pomocą symulatora kabla, przełączając sekcję trzech przełączników między pozycjami 1 i 2. Trzeba pamiętać o zerowaniu toru pomiarowego przy każdej zmianie ustawień symulatora (naciśnięcie klawisza „0” na klawiaturze wzmacniacza).

Ad 6. Zapis przebiegów dynamicznych w torze pomiarowym za pomocą karty pomiarowej

Dzięki zastosowaniu wyjścia analogowego (po przetworniku C/A) wzmacniacza możliwa jest obserwacja i rejestracja dynamiczna wyników pomiarów za pomocą karty pomiarowej w komputerze. Wyjście analogowe zapewnia pasmo pracy w zakresie ustalonym

w konfiguracji wzmacniacza (częstotliwość graniczna filtru) maksymalnie do 200 Hz. Bezpośrednia transmisja wyników pomiarów poprzez interfejs RS232C umożliwia pomiar z częstotliwością do 10 pomiarów na sekundę (pasmo pracy poniżej 5 Hz).

Wybranej w pkt. 2 wartości zakresu pomiarowego masy podczas rejestracji będzie odpowiadała wartość napięcia 10 V. Przeprowadzić eksperyment, w tym celu:

- podłączyć wyjście analogowe wzmacniacza do karty pomiarowej i uruchomić program "Rejestracja.dsb" w środowisku DasyLab.
- zawiesić ciężarek na belce, zrównoważyć wzmacniacz (nacisnąć "0" na panelu wzmacniacza), uruchomić proces rejestracji i pobudzić belkę do drgań.

Na podstawie zarejestrowanego oscylogramu wyznaczyć parametry dynamiczne belki.

Drgania swobodne belki można opisać zależnością ogólną:

$$u(t) = K \cdot \exp(-\xi \omega_0 t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

gdzie: ξ – stopień tłumienia,

ω – pulsacja drgań tłumionych belki,

ω_0 – pulsacja drgań własnych nietłumionych belki,

K – stały współczynnik wynikający z parametrów mechanicznych belki.

przy czym amplituda drgań maleje z czasem wykładniczo, a okres T i pulsacja ω drgań wynoszą odpowiednio:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{oraz} \quad \omega = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (10)$$

Ponieważ różnica wartości sąsiednich amplitud jest bardzo mała, należy skorzystać z amplitud maksimów tego samego znaku odległych na wykresie o n okresów A_1 i A_{1+n} i okres T drgań tłumionych można wyznaczyć na podstawie odległości czasowej T_n między dwoma takimi maksimami:

$$T = \frac{T_n}{n} \quad (11)$$

natomiast wartość stopnia tłumienia opisuje zależność:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot n}{\ln \frac{A_{1+n}}{A_1}} \right)^2}} \quad (12)$$

Na podstawie wyznaczonych wartości okresu drgań tłumionych T oraz stopnia tłumienia ξ korzystając z zależności (10) można wyznaczyć pulsację drgań własnych nietłumionych ω_0 obiektu drgającego.

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym,
2. Karta pomiarowa NI6036 wraz z płytką łączeniową,
3. Oprogramowanie DasyLab wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
4. Wzmacniacz pomiarowy MVD 2555,
5. Oprogramowanie *Catman®Express* firmy HBM,
6. Belka gięta z naklejonymi czujnikami tensometrycznymi,
7. Symulator długiego kabla przyłączeniowego.

Ćwiczenie 6

Badanie właściwości metrologicznych toru pomiarowego z modulacją AM przeznaczonego do współpracy z czujnikami wielkości nieelektrycznych

Program ćwiczenia

1. Badanie właściwości metrologicznych transformatorowego czujnika LVDT drogi,
 - a. wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika LVDT,
 - b. obserwacja sygnałów na poszczególnych etapach przetwarzania w torze pomiarowym: czujnik LVDT – wzmacniacz z modulacją AM.
2. Wyznaczenie charakterystyki statycznej wzmacniacza pomiarowego z modulacją AM.
3. Wyznaczanie charakterystyki statycznej układu czujnik + tor z modulacją amplitudową.

Zakres wymaganych wiadomości

Wzmacniacz z przetwarzaniem pracujący na zasadzie modulacji amplitudy. Właściwości metrologiczne zmiennoprądowego mostka niezrównoważonego (dokładność, czułość, liniowość). Budowa i właściwości metrologiczne indukcyjnościowych i transformatorowych (LVDT) czujników przemieszczenia.

Literatura

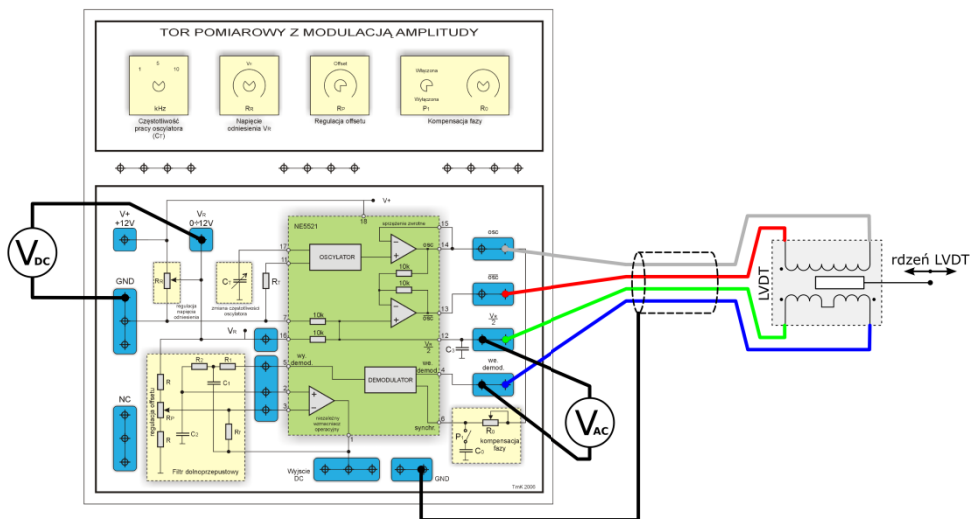
- [1] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] B. Szumielewicz, B. Słomski, W. Styburski. *Pomiary elektroniczne w technice*. WNT, Warszawa, 1982.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Badanie właściwości metrologicznych transformatorowego czujnika LVDT drogi

Przedmiotem badań jest tor pomiarowy złożony z transformatorowego czujnika LVDT współpracującego ze wzmacniaczem pracującym na zasadzie modulacji amplitudy. Tor zbudowano na bazie układu scalonego NE5521, który zawiera oscylator generujący sygnał zasilający czujnik oraz elementy przetwarzania: wzmacniacz zmiennoprądowy, demodula-

tor fazoczuły oraz filtr dolnoprasmowy. Celem pomiarów jest wyznaczenie charakterystyki czujnika oraz obserwacja przebiegów czasowych w torze przetwarzania wzmacniacza z modulacją AM.



Rys. 1. Schemat połączeń przy współpracy toru pomiarowego z czujnikiem LVDT.

Ad 1a. Wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika LVDT

Warunki poprawnej pracy układu:

- układ posiada własny wewnętrzny zasilacz stabilizowany 12 V,
- sprawdzić i ew. wyregulować wartość napięcia odniesienia układu $V_R = 10\text{ V}$ (w razie potrzeby wartość tego napięcia regulujemy za pomocą potencjometru R_R , obserwując wskazania woltomierza V_{DC}),
- ustawić wartość częstotliwości oscylatora $f_{osc} = 5\text{ kHz}$ (wartość częstotliwości oscylatora wybieramy za pomocą przełącznika),
- ustawić przełącznik kompensacji fazy na pozycję "wyłączony".

Przebieg eksperymentu:

- Do uprzednio przygotowanego układu, pomiędzy zaciski We. Demod., a $V_R/2$ podłączyć woltomierz mierzący wartość skuteczną napięcia zmiennego (np. HP 34401A lub V560 z wybraną funkcją pomiarową AC).
- Pokrętlę śruby mikrometrycznej znaleźć minimalne wskazanie woltomierza – jest to zero konstrukcyjne czujnika.
- Zmieniając położenie (x) rdzenia śrubą mikrometryczną np. co 0.5mm odczytywać wartość napięcia na wyjściu czujnika (U_{AC}). Pomiarów dokonać w zakresie $\pm 10\text{ mm}$ względem położenia zerowego.
- Wykreślić zależność $U_{AC} = f(x)$.

Na podstawie otrzymanych pomiarów należy określić błąd nieliniowości, oraz wykreślić charakterystykę bezwzględnego błędu nieliniowości w funkcji przesunięcia x . W celu wyznaczenia błędu nieliniowości przyjąć ujemne wartości napięcia dla przesunięcia $x < 0$. Następnie aproksymować punkty pomiarowe wielomianem stopnia pierwszego ($y = ax$), przyjmując za kryterium minimum sumy kwadratów błędów.

Błąd bezwzględny Δ_U przyjąć jako różnicę pomiędzy wartością napięcia z pomiarów, a wartością napięcia wynikającą z równania przyjętej prostej aproksymującej:

$$\Delta_U = U_{\text{pomiar}} - U_{\text{oblicz}} \quad (1)$$

Przedstawić przebieg tak przyjętego błędu bezwzględnego względem przesunięcia x .

Błąd nieliniowości $\delta_{U_{\max}}$ określić jako stosunek maksymalnej wartości modułu błędu bezwzględnego odniesionego do zakresu pomiarowego:

$$\delta_{U_{\max}} = \frac{|\Delta_U|_{\max}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (2)$$

Ad 1b. Obserwacja sygnałów na poszczególnych etapach przetwarzania w torze pomiarowym: czujnik LVDT – wzmacniacz z modulacją AM

Obserwacji przebiegów dokonujemy w układzie ze schematu na rys. 1 za pomocą oscyloskopu cyfrowego, dla różnych położenia rdzenia w czujniku LVDT: położenia neutralnego (zerowy sygnał wyjściowy) oraz dwóch położenia rdzenia w kierunkach przeciwnych do neutralnego.

Uwaga!

Masy obydwu kanałów oscyloskopu przyłączyć do potencjału $V_R/2$ dla wszystkich obserwacji w torze przetwarzania.

- Obserwacja przebiegów OSC i $\overline{\text{OSC}}$ (zasilanie czujnika LVDT – składowa nośna)
 - masy obu kanałów oscyloskopu przyłączyć do potencjału $V_R/2$,
 - końcówki pomiarowe do zacisków opisanych OSC i $\overline{\text{OSC}}$.
- Obserwacja sygnału wyjściowego z czujnika LVDT (We. Demod.)
 - masy pomiarowe podłączone jak poprzednio,
 - sondę kanału pierwszego pozostawić podłączoną do OSC,
 - sondę kanału drugiego podłączyć do zacisku We. Demod. (wyjście z czujnika).
- Obserwacja sygnału po demodulacji
 - masy pomiarowe podłączone jak poprzednio,
 - sondę kanału pierwszego podłączyć do wyjścia czujnika LVDT (We. Demod.),
 - sondę kanału drugiego podłączyć do wyjścia demodulatora (Wy. Demod.).
- Obserwacja przebiegu na wyjściu DC
 - masy pomiarowe podłączone jak poprzednio,
 - sondę kanału pierwszego podłączyć do wyjścia demodulatora (Wy. Demod.),
 - sondę kanału drugiego podłączyć do wyjścia napięcia stałego (Wyjście DC).

- Obserwacja przebiegu na wyjściu demodulatora przy częstotliwości innej niż charakterystyczna dla czujnika:
 - przełącznikiem wyboru częstotliwości pracy oscylatora nastawić wartość 10kHz,
 - masy pomiarowe podłączone jak poprzednio,
 - sondę kanału pierwszego dołączyć do OSC,
 - sondę kanału drugiego do We. Demod. (wyjście z LVDT),
 - następnie sondę kanału pierwszego przełączyć do Wy. Demod.

Uwaga: *Należy zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem zasilającym czujnik (OSC), a sygnałem wyjściowym z czujnika.*

- Kompensacja fazy:
 - częstotliwość oscylatora ustawiona na 10kHz i połączenia jak w punkcie poprzednim,
 - ustawić przełącznik P1 w położeniu „włączona” kompensacja fazy,
 - pokrętle potencjometru R_0 doprowadzić do sytuacji, aby kształt sygnału na wyjściu demodulatora był taki sam, jak przy zasilaniu częstotliwością charakterystyczną (5kHz).

Uwaga: *Należy zwrócić uwagę, że w trakcie regulacji przesunięciu w fazie nie ulega sygnał wyjściowy z czujnika, lecz sygnał synchronizujący demodulator, podawany wprost z wyjścia oscylatora.*

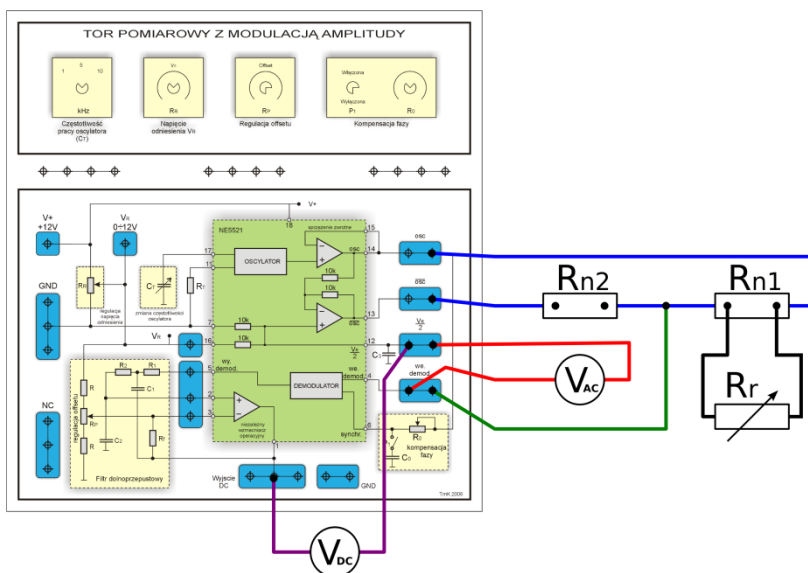
Ad 2. Wyznaczenie charakterystyki statycznej wzmacniacza pomiarowego z modulacją AM

Połączyć układ zgodnie z rys. 2.

- warunki pracy układu jak w pkt.1a. ($V_R = 10\text{ V}$, $f_{OSC} = 5\text{ kHz}$, kompensacja fazy- wyl.),
- zestawić układ półmostka rezystancyjnego i podłączyć do wzmacniacza według schematu (rys. 2); gdzie: R_{n1} , R_{n2} – rezystory wzorcowe 1 k Ω , a R_r – opornik dekadowy 10*(0,1 Ω ÷ 10 k Ω). Opornik dekadowy R_r włączony równolegle z R_{n1} nastawić na maksymalną wartość,
- pomiędzy zaciski We. Demod., a $V_R/2$ włączyć woltomierz wartości skutecznej napięcia przemiennego (V_{AC}) HP34401A nastawiony na funkcję pomiaru AC i automatyczną zmianę zakresu pomiarowego,
- pomiędzy zaciski Wyjście DC, a $V_R/2$ włączyć woltomierz napięcia stałego (V_{DC}), HP34401A nastawiony na pomiar DC i automatyczną zmianę zakresu pomiarowego.

Przebieg eksperymentu:

- odłączyć na chwilę przewód łączący półmostek z wejściem demodulatora, a następnie zamiast woltomierza wartości skutecznej V_{AC} , wykonać zworę łączącą to wejście z potencjałem odniesienia $V_R/2$ (napięcie $V_{AC} = 0\text{ V}$ – patrz rys.2).
- potencjometrem R_p doprowadzić do wyzerowania wskazania woltomierza na wyjściu DC ($V_{DC} = 0\text{ V}$).



Rys. 2. Schemat układu do wyznaczenia charakterystyki statycznej wzmacniacza pomiarowego.

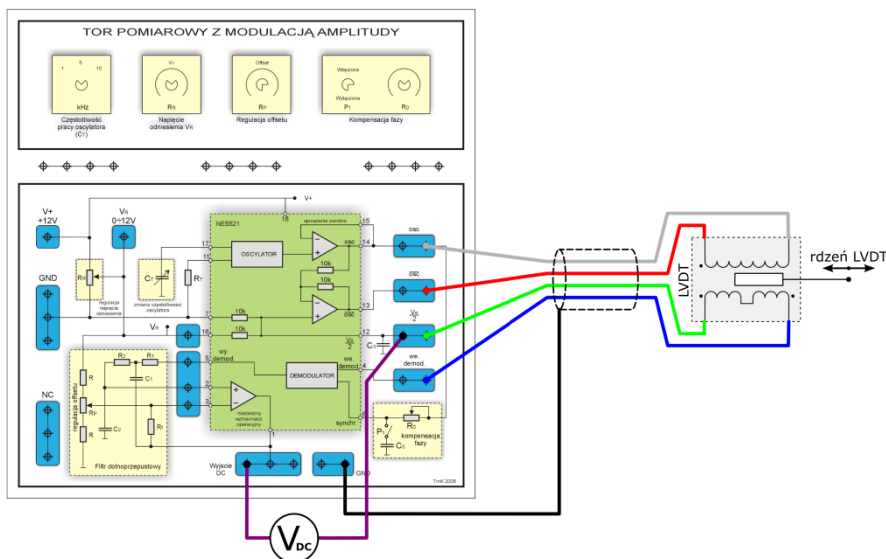
- po takim wstępnym zrównoważeniu toru usunąć zworę, podłączyć ponownie woltmierz V_{AC} i ustawić w pozycji „0” wszystkie dekady opornika R_r – odpowiada to podaniu pełnego sygnału OSC na demodulator i maksymalnemu (dodatniemu) napięciu na wyjściu DC.
- zanotować wskazania obu przyrządów (V_{AC} i V_{DC}), a następnie zwiększając rezystancję R_r ustawiać wartości skuteczne napięcia wejściowego malejąco co 50 mV (lub 100 mV) i notować odpowiadające im wartości napięcia na wyjściu DC.
- po osiągnięciu napięcia V_{AC} bliskiego zeru (maksymalna wartość rezystancji opornika dekadowego) należy rezystor R_r odłączyć od R_{n1} i połączyć równolegle do R_{n2} .
- zmniejszając rezystancję R_r ustawiać wartości skuteczne napięcia wejściowego rosnąco co 50 mV (lub 100 mV) i notować odpowiadające im wartości napięcia na wyjściu DC dochodząc w taki sposób do zerowej wartości rezystancji R_r – co odpowiada podaniu pełnego sygnału OSC na demodulator i maksymalnemu (ujemnemu) napięciu na wyjściu DC.

Uwaga: Nie jest konieczne dokładne równoważenie półmostka podczas pomiarów. Punkt (0,0) zostanie osiągnięty podczas wstępnego równoważenia toru pomiarowego

- na podstawie wyników pomiarów należy narysować charakterystykę toru $U_{DC} = f(U_{AC})$.
- Uwaga: dla jednoznaczności charakterystyki należy przyjąć, że wartości skuteczne napięcia na wejściu demodulatora, dla których napięcie na wyjściu DC jest ujemneznaczamy na charakterystyce ze znakiem minus.
- na podstawie pomiarów dokonać aproksymacji charakterystyki przetwarzania za pomocą prostej o równaniu $y = ax$, oraz wyznaczyć błąd nieliniowości toru pomiarowego (zgodnie z procedurą podaną w pkt. 1a).

Ad 3. Wyznaczanie charakterystyki statycznej układu czujnik + tor z modulacją amplitudową

Połączyć układ zgodnie z rysunkiem 3.



Rys. 3. Schemat układu do wyznaczenia charakterystyki statycznej układu czujnik + tor z modulacją amplitudową.

- Podłączyć czujnik LVDT do układu pomiarowego zgodnie z rysunkiem 3.
- Warunki pracy układu jak w pkt. 1a. ($V_R = 10 \text{ V}$, $f_{OSC} = 5 \text{ kHz}$, kompensacja fazy- wył.).

Przebieg eksperymentu:

- pokręć śrubę mikrometrycznej znaleźć położenie rdzenia, dla którego wskazanie woltomierza na wyjściu jest minimalne co do wartości (tzw. zero czujnika),
- potencjometrem R_P sprowadzić wskazanie woltomierza na wyjściu DC do zera (wstępne zrównoważenie układu),
- zmieniając położenie rdzenia śrubą mikrometryczną np. co 0,5 mm odczytywać wartość napięcia na wyjściu V_{DC} . Pomiarów dokonać w zakresie $\pm 10 \text{ mm}$ względem położenia zerowego (w całym zakresie pomiarowym czujnika),
- na podstawie wyników pomiarów należy narysować charakterystykę toru $U_{DC} = f(x)$,
- na podstawie pomiarów dokonać aproksymacji charakterystyki przetwarzania za pomocą prostej o równaniu $y = ax$, oraz wyznaczyć błąd nieliniowości całego układu czujnik + tor pomiarowy (zgodnie z procedurą podaną w pkt. 1a).

Wykaz aparatury

1. Układ pomiarowy – tor z modulacją amplitudy,
2. Multimetr HP34401A lub HP34410A (łącznie 2 sztuki),
3. Oscyloskop dwukanałowy Tektronix TDS1012B,
4. Rezystor wzorcowy normalny $R_n = 1\text{k}\Omega$ 2 szt.,
5. Rezystor dekadowy $10*(0,1\Omega \div 10\text{k}\Omega)$ 1 szt.,
6. Czujnik transformatorowy PTx20 firmy Peltron zintegrowany mechanicznie ze śrubą mikrometryczną,
7. Częstościomierz.

Ćwiczenie 7

Wyznaczenie charakterystyk metrologicznych laserowych czujników przemieszczenia liniowego, cyfrowych czujników kąta oraz czujników przyśpieszenia

Program ćwiczenia

1. Wyznaczenie charakterystyki statycznej laserowego czujnika przemieszczenia ODS30
 - a. skalowanie czujnika laserowego za pomocą mikroskopu spiralnego,
 - b. wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika laserowego i błędu nieliniowości.
2. Czujnik do pomiaru grubości na bazie 2 czujników laserowych drogi typu OADM12.
3. Wyznaczenie charakterystyki przetwarzania cyfrowego absolutnego encodera kąta,
 - a. obserwacja stanów logicznych wyjścia 10 bitowego czujnika kąta w kodzie Gray'a,
 - b. zastosowanie akcelerometru typu ADXL203 do wyznaczania kąta.
4. Wyznaczenie charakterystyki statycznej indukcyjnościowego czujnika przemieszczenia,
 - a. skalowanie toru pomiarowego czujnika,
 - b. wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika i błędu nieliniowości.

Zakres wymaganych wiadomości

Laserowe czujniki przemieszczenia i odległości. Indukcyjnościowe czujniki drogi. Cyfrowe przetworniki do bezwzględnego pomiaru kąta (encodery w kodzie Gray'a). Pomiar przyśpieszenia za pomocą pojemnościowych czujników akcelerometrycznych.

Literatura

- [1] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] Materiały katalogowe firmy Analog Devices (<http://www.analog.com>).
- [4] Materiały katalogowe firmy HBM GmbH Darmstadt (<http://www.hbm.de>).
- [5] Materiały katalogowe firmy Omron (<http://components.omron.eu>).
- [6] Materiały katalogowe firmy Baumer (<http://www.baumerelectric.com>).

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wyznaczenie charakterystyki statycznej laserowego czujnika przemieszczenia ODS30

W ćwiczeniu stosowane są laserowe czujniki triangulacyjne, których układ pomiarowy pracuje w jednej płaszczyźnie. Zasada działania czujników pokazana jest na rysunku 1. Wiązka światła laserowego ogniskowana jest w punkcie A na obiekcie, do którego odległość jest mierzona. Odległość x obiektu od czujnika może zmieniać się w zakresie pomiarowym od punktu A' do A'' . Obraz punktu A przez soczewkę obrazującą tworzony jest na liniowym detektorze położenia (Position Sensitive Detector) w punkcie B . Pomiar odległości x pomiędzy badanym obiektem, a czujnikiem odbywa się poprzez pomiar przemieszczenia obrazu wiązki laserowej na fotodetektorze PSD. Przemieszczenie obiektu od punktu A do A' powoduje zmianę położenia wiązki z punktu B do B' na detektorze PSD, a wiążąca te przemieszczenia zależność nieliniowa może być wyprowadzona na podstawie zależności pomiędzy trójkątami (rys.1):

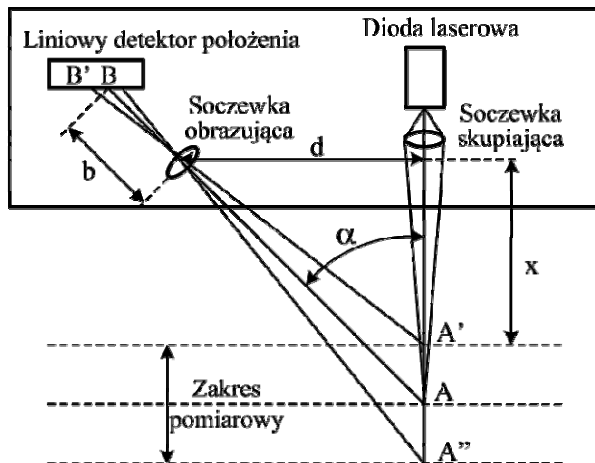
$$x = \frac{d \cdot b \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sin \alpha + BB'} \quad (1)$$

gdzie: d – jest bazą (odległość pomiędzy soczewkami),

b – jest odległością pomiędzy soczewką obrazującą a detektorem PSD,

α – jest kątem pomiędzy promieniem padającym i odbitym dla odległości referencyjnej (odpowiadającej środkowi zakresu pomiarowego).

Wszystkie te wielkości mają charakter stałych konstrukcyjnych.



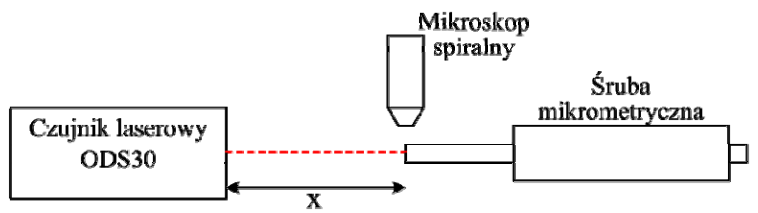
Rys. 1. Zasada działania laserowego czujnika triangulacyjnego.

Ad 1a. Skalowanie czujnika laserowego typu ODS30 za pomocą mikroskopu spiralnego

Będący przedmiotem badań czujnik laserowy ODS30 charakteryzują parametry:

- odległość referencyjna (środek zakresu) 30 mm,
- zakres pomiarowy 28 – 32 mm (± 2 mm),
- rozdzielczość 1 μm ,
- liniowość 40 μm ,
- częstotliwość pomiaru 1 kHz,
- sygnał wyjściowy napięciowy 1 V (28 mm),
5 V (30 mm),
9 V (32 mm).

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej czujnika stosowany jest układ do zadawania przyrostu odległości za pomocą śruby mikrometrycznej (rys. 2). Czujnik zamocowany jest nieruchomo, a generowany przez niego promień laserowy pada na ruchome wrzeciono śruby mikrometrycznej. Przesunięcie wrzeciona kontrolowane jest za pomocą mikroskopu spiralnego, który umożliwia pomiar przesunięcia z dokładnością 1 μm .



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań laserowego czujnika przesunięcia.

Wyjście napięciowe z czujnika laserowego podane jest na kartę pomiarową NI6221. Przygotowana w środowisku LabView aplikacja (start_ODS30) umożliwia ustawianie parametrów karty, kalibrację czujnika laserowego oraz przeprowadzanie pomiarów przesunięcia.

W celu przeprowadzenia kalibracji toru pomiarowego przesunięcia należy wykonać następujące czynności:

- ustawić wrzeciono śruby w odległości referencyjnej od czujnika ($x_1 = 30$ mm) - wskaźnikiem poprawnie ustawionej odległości jest napięcie wyjściowe czujnika laserowego ($U_1 = 5$ V),
- kontrolując za pomocą mikroskopu przesunięcie końcówki wrzeciona śruby mikrometrycznej zwiększyć odległość o 1 mm ($x_2 = 31$ mm),
- dokonać pomiaru napięcia wyjściowego czujnika U_2 .

Wartość mierzonej odległości x wyznaczmy na podstawie równania prostej:

$$x = k_1 \cdot U + k_0 \quad (2)$$

gdzie:

$$k_1 = \frac{x_2 - x_1}{U_2 - U_1} \quad k_0 = \frac{x_1 \cdot U_2 - x_2 \cdot U_1}{U_2 - U_1} \quad (3)$$

Po wykonaniu kalibracji toru pomiarowego przechodzimy do zakładki pomiarowej aplikacji, przy pomocy której wyznaczona zostanie charakterystyka statyczna czujnika.

Ad 1b. Wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika laserowego i błędu nieliniowości

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej i błędu nieliniowości czujnika laserowego wykonujemy następujące czynności:

- zadajemy przemieszczenie wrzeciona śruby mikrometrycznej x_S w zakresie ± 2 mm od położenia referencyjnego (odległość $x_S = 28 \div 32$ mm od czujnika do wrzeciona śruby) z krokiem 0,2 mm (zmiana o 0,2 mm odpowiada 20 działkom na noniuszu śruby),
- odczytujemy wartości napięcia wyjściowego czujnika laserowego z wykorzystaniem karty pomiarowej i aplikacji pomiarowej w środowisku LabVIEW,
- na podstawie (2) i (3) wyznaczana jest wartość odległości x ,
- tworzymy charakterystyki statyczne: $x = f(x_S)$ oraz $(x - x_S) = f(x_S)$.
- na podstawie drugiej z charakterystyk wyznaczamy bezwzględny błąd nieliniowości czujnika laserowego:

$$\Delta_n = \max_{x_S} |x - x_S| \quad (4)$$

Ad 2. Czujnik do pomiaru grubości na bazie 2 czujników laserowych drogi typu OADM12

Na rysunku 3 przedstawiono przykład zastosowania czujników laserowych do bezstykowego pomiaru grubości. Dzięki zastosowaniu dwóch czujników pracujących w układzie różnicowym kompensowane są ewentualne zakłócenia spowodowane np. ruchem obiektu, którego grubość wyznaczamy.

W układzie do pomiaru grubości dwa nieruchomo zamocowane laserowe czujniki odległości oddalone są od siebie o znaną wartość bazową równą D . Każdy z czujników mierzy odległość x od obiektu (odpowiednio x_A oraz x_B):

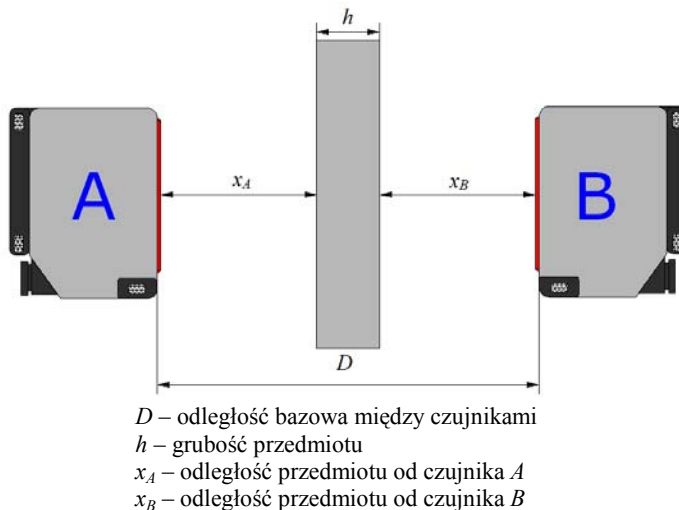
$$x = k_1 \cdot U + k_0 \quad (5)$$

Grubość obiektu h wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$h = D - (x_A + x_B) \quad (6)$$

Na podstawie danych katalogowych czujników:

- zakres pomiarowy 16 – 26 mm,
- zakres napięć wyjściowych 0 – 10 V.



Rys. 3. Schemat układu dwóch czujników laserowych do pomiaru grubości.

wyznaczane są wartości współczynników k_1 i k_0 w równaniu (5) zgodnie z (3), przy czym:

$$x_1 = 16 \text{ mm}, \quad x_2 = 26 \text{ mm}, \quad U_1 = 0 \text{ V}, \quad U_2 = 10 \text{ V} \quad (7)$$

Przygotowana w środowisku LabVIEW aplikacja (start_grubościomierz) umożliwia ustawianie parametrów karty, kalibrację czujnika laserowego oraz przeprowadzanie pomiarów grubości. W celu sprawdzenia dokładności grubościomierza wykonać pomiar szerokości stalowej płytki o znanej, wzorcowej wartości grubości. Następnie wykonać sprawdzenie dokładności grubości szczelinomierza seryjnej produkcji. W tabeli 1 zestawiono sposób podłączenia sygnałów do karty pomiarowej.

Tabela 1
Sposób podłączenia sygnałów do karty pomiarowej.

Wejście	Kanał	Tryb	Nazwa pliku
ODS30	Ch 0	RSE	Start_ODS30
Grubościomierz			Start_grubościomierz
Czujnik A	Ch 1	RSE	
Czujnik B	Ch 2	RSE	

Ad 3. Wyznaczenie charakterystyki przetwarzania cyfrowego absolutnego enkodera kąta

Na stanowisku przygotowano układ pomiarowy umożliwiający pomiar kąta metodą cyfrową i analogową. Zastosowano w tym celu 10-bitowy cyfrowy encoder w kodzie Gray'a E6C3 firmy Omron, natomiast do analogowego pomiaru kąta zastosowano

2-osiowy akcelerometr pojemnościowy ADXL203 firmy Analog Devices. W tabeli 2 zestawiono sposób podłączenia sygnałów pomiarowych do karty pomiarowej.

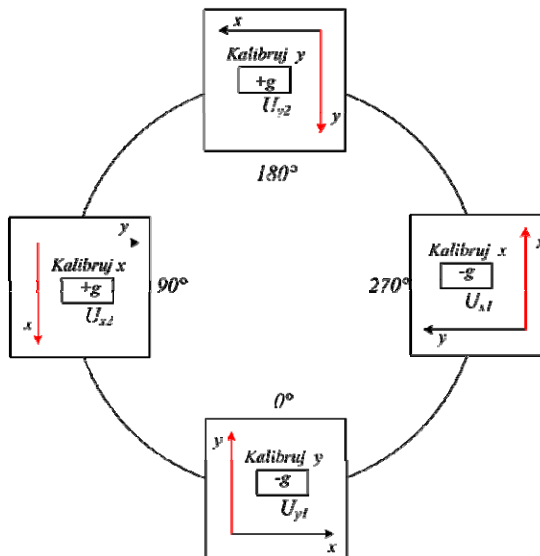
Przygotowana w środowisku LabVIEW aplikacja (start_pomiar_kata) umożliwia ustawianie parametrów karty, kalibrację czujników przyspieszenia oraz obserwację stanów logicznych w kodzie Gray'a i binarnych cyfrowego czujnika kąta, a także przeprowadzanie pomiarów kąta za pomocą encodera i akcelerometrów.

Cyfrowy czujnik kąta sprzężony jest mechanicznie z osią obrotu koła, które może obracać się w zakresie od 0 do 350°. Na kole zamontowano 2-osiowy akcelerometr wraz z poziomnicami umożliwiającymi pozycjonowanie czujników. Na rysunku 4 pokazano sposób położenia czujników oraz przyjęty układ współrzędnych. Naniesione wartości kąta odpowiadają wskazaniom encodera, które odniesione są do umownego zerowego kąta położenia odpowiadającego ograniczeniu obrotu. Osie X oraz Y odpowiadają osiom pomiarowym akcelerometrów.

Tabela 2

Sposób podłączenia sygnałów do karty pomiarowej.

Wejście	Kanał	Tryb	Nazwa pliku
Encoder w kodzie Gray'a	Ch 0 – Ch9 (odpowiednio dla bitów od 0 do 9)	RSE	Start_pomiar_kata
Akcelerometr ADXL203EB			
Napięcie zasilające	Ch 10	RSE	
Czujnik w osi Y	Ch 11	RSE	
Czujnik w osi X	Ch 12	RSE	



Rys. 4. Sposób położenia czujników oraz przyjęty układ współrzędnych.

Ad 3a. Obserwacja stanów logicznych wyjścia 10 bitowego czujnika kąta w kodzie Gray'a

W celu obserwacji sposobu działania cyfrowego czujnika kąta należy wykonać następujące czynności:

- obracając bardzo wolno koło począwszy od położenia "zerowego" kąta obserwować wartości stanów logicznych wyjścia cyfrowego w kodzie Gray'a i porównać ze wskazaniami kąta w kodzie binarnym oraz w kodzie dziesiętnym,
- jaka funkcja matematyczna umożliwia transformację wartości kąta wyrażonych w kodzie Gray'a do wartości wyrażonych w kodzie binarnym i dziesiętnym?

Ad 3b. Zastosowanie akcelerometru typu ADXL203 do wyznaczania kąta

W celu pomiaru składowych przyspieszenia i na ich podstawie kąta położenia koła (rys. 4) należy przeprowadzić skalowanie torów pomiarowych. W tym celu ustawiamy koło w taki sposób, aby encoder wskazywał wartość kąta bliską zeru. Korzystając z poziomnic ustalamy pionowy kierunek działania przyspieszenia ziemskiego w osi Y czujnika. Odczytujemy wartość napięcia wyjściowego akcelerometru w osi Y. Następnie obracamy koło o 180° , i wykorzystując poziomnicę ponownie ustalamy zgodność kierunków osi Y czujnika i przyspieszenia ziemskiego. W pierwszym przypadku na czujnik działało przyspieszenie $-g$ w drugim $+g$. Liniowa funkcja przetwarzania czujnika ma postać:

$$a_y = k_{1y} \cdot U_y + k_{0y} \quad (8)$$

Podczas skalowania wykonano dwa pomiary napięć:

$$\begin{aligned} U_{y1} \quad \text{dla} \quad a_{y1} = -g \\ U_{y2} \quad \text{dla} \quad a_{y2} = g \end{aligned} \quad (9)$$

Na ich podstawie można wyznaczyć współczynniki funkcji (8)

$$k_{1y} = \frac{a_{y2} - a_{y1}}{U_{y2} - U_{y1}} = \frac{2g}{U_{y2} - U_{y1}} \quad (10)$$

$$k_{0y} = \frac{a_{y1} \cdot U_{y2} - a_{y2} \cdot U_{y1}}{U_{y2} - U_{y1}} = -g \cdot \frac{U_{y2} + U_{y1}}{U_{y2} - U_{y1}} \quad (11)$$

Podobnie postępujemy i identyczne zależności otrzymujemy dla osi X, przy czym należy pamiętać, że pierwszy pomiar wykonamy dla kąta 270° ($a_{x1} = -g$), a drugi dla kąta 90° ($a_{x2} = +g$) i wtedy zależności będą identyczne jak dla osi Y, a zmianie ulegną jedynie indeksy y na x . Na podstawie wyznaczonych pomiarowo składowych przyspieszenia a_x i a_y wyznaczana jest wartość kąta wraz z ćwiartką, w której się on znajduje.

Po wykonaniu skalowania wyznaczyć charakterystykę kąta mierzonego za pomocą akcelerometrów α_{ake} w funkcji kąta mierzonego metodą cyfrową α_{cyfr} . Następnie opracować:

- charakterystyki statyczne: $\alpha_{ake} = f(\alpha_{cyfr})$ oraz $(\alpha_{ake} - \alpha_{cyfr}) = f(\alpha_{cyfr})$,

- na podstawie drugiej z charakterystyk wyznaczamy bezwzględny błąd nieliniowości akcelerometrycznego czujnika kąta:

$$\Delta_n = \max_{\alpha_{cyfr}} |\alpha_{ake} - \alpha_{cyfr}| \quad (12)$$

Ad 4. Wyznaczenie charakterystyki statycznej indukcyjnościowego czujnika przemieszczenia

Na stanowisku laboratoryjnym przygotowano układ do wyznaczania charakterystyki statycznej indukcyjnościowego czujnika przemieszczenia typu 1-WA/20mm-L firmy HBM. Przeszacowania rdzenia czujnika zadawane są za pomocą mechanicznie sprzężonego z nim wrzeciona śruby mikrometrycznej.

Będący przedmiotem badań czujnik indukcyjnościowy charakteryzują parametry:

- zakres pomiarowy 20 mm,
- liniowość 0,09% zakresu (0,018 mm),
- zakresowy sygnał wyjściowy 80 mV/V ($\pm 1\%$).

Czujnik współpracuje w torze pomiarowym ze wzmacniaczem typu MVD2555 działającym na zasadzie modulacji amplitudy. Wzmacniacz dysponuje analogowym napięciem wyjściowym o wartości 10V, które odpowiada zakresowi wielkości mierzonej.

Ad 4a. Skalowanie toru pomiarowego czujnika

Czujnik połączony jest 6-przewodowo ze wzmacniaczem MVD2555. Wzmacniacz należy skonfigurować ustawiając następujące parametry:

Input (zakres czułości)	0,2 mV/V ÷ 4 mV/V,
Excitation (amplituda napięcia zasilającego U_S)	2,5 V,
Transducer (typ czujnika)	full bridge (pełny mostek),
Unit (jednostka)	mm.

Aby wyskalować tor pomiarowy w jednostkach wielkości mierzonej należy ustawić również we wzmacniaczu parametry odzwierciedlające parametry czujnika. W tym celu ustawiamy we wzmacniaczu następujące parametry:

- **decimal point = 0,001** (mnożnik skali, określa liczbę miejsc wyniku po przecinku),
- **nominal value = 20 mm** (lub w pewnych wersjach oprogramowania **Indicating range**, określa wartość nominalną wielkości mierzonej),
- **measuring range = 80 mV/V** (lub w pewnych wersjach oprogramowania **range**, określa nominalną wartość wielkości wejściowej wzmacniacza).

Wzmacniacz skaluje równocześnie analogowy sygnał wyjściowy U , przy czym wartość napięcia $U = 10$ V odpowiada przyjętej, zakresowej wartości wielkości mierzonej x , tzn. w tym przypadku 20 mm. Stąd czułość toru pomiarowego wynosi:

$$S = \frac{U}{x} = \frac{1}{2} \frac{V}{mm} \quad (13)$$

Ad 4b. Wyznaczenie charakterystyki statycznej czujnika i błędu nieliniowości

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej i błędu nieliniowości czujnika indukcyjnościowego wykonujemy następujące czynności:

- zadajemy przemieszczenie wrzeciona śruby mikrometrycznej x_S w zakresie 20mm z krokiem 0,5 mm (zmiana o 0,5 mm odpowiada 50 działkom na noniuszu śruby - czyli jednemu pełnemu obrotowi noniusza),
- odczytujemy wartości przemieszczenia wprost z wyświetlacza wzmacniacza w [mm] lub poprzez pomiar napięcia wyjściowego U ze wzmacniacza (z wykorzystaniem karty pomiarowej ew. uniwersalnego przyrządu pomiarowego, np. HP34410A),
- w przypadku pomiaru napięcia U na podstawie (13) wyznaczana jest wartość odległości x ,
- tworzymy charakterystyki statyczne: $x = f(x_S)$ oraz $(x - x_S) = f(x_S)$.
- na podstawie drugiej z charakterystyk wyznaczamy bezwzględny błąd nieliniowości czujnika laserowego:

$$\Delta_n = \max_{x_S} |x - x_S| \quad (14)$$

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym i portem COM,
2. Karta pomiarowa NI6221 wraz z płytką łączeniową,
3. Oprogramowanie LabView wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
4. Laserowy czujnik przemieszczenia ODS30,
5. Grubościomierz na bazie 2 czujników laserowych OADM12,
6. Cyfrowy czujnik kąta E6C3 firmy Omron,
7. Akcelerometr ADXL203EB,
8. Indukcyjnościowy czujnik przemieszczenia 1-WA/20mm-L firmy HBM,
9. Śruby mikrometryczne 2szt.,
10. Mikroskop spiralny.

Ćwiczenie 8

Badanie właściwości metrologicznych bezstykowego, pirometrycznego przetwornika pomiarowego temperatury

Program ćwiczenia

1. Konfiguracja i badanie przemysłowego pirometrycznego przetwornika temperatury,
 - a. wyznaczenie współczynnika emisyjności obiektu pomiaru,
 - b. określenie wpływu współczynnika emisyjności na wynik pomiaru,
 - c. wpływ przesłon ograniczających bezpośrednio oddziaływanie promieniowania temperaturowego na pirometr.
2. Rejestracja mierzonej temperatury i wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej pirometru.
3. Nastawianie oraz odczyt parametrów pirometru z wykorzystaniem interfejsu portu szeregowego.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawy fizyczne działania pirometrów. Rodzaje pirometrów i ich właściwości metrologiczne. Interfejs szeregowy RS-232C. Tryb przesyłania danych. Właściwości dynamiczne przetworników temperatury.

Literatura

- [1] W. Nawrocki. *Komputerowe Systemy Pomiarowe*. WKiŁ, Warszawa, 2002.
- [2] S. Tumański. *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa, 2007.
- [3] M. Miłek. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
- [4] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski. *Termometria*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1998.
- [5] W. Mielczarek. *Szeregowe interfejsy cyfrowe*. Helion, Gliwice, 1993.
- [6] Instrukcja obsługi pirometru typu MID02 firmy Raytek MI.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Konfiguracja i badanie przemysłowego pirometrycznego przetwornika temperatury

Pirometry służą do bezstykowego pomiaru temperatury, a zasada ich działania jest oparta na prawie Stefana-Boltzmanna, które określa zależność całkowitego natężenia promieniowania ciał od ich temperatury. Zależność całkowitego natężenia promieniowania M_0 wysyłanego przez ciało doskonale czarne (jest to ciało pochłaniające całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta padania i widma promieniowania) od temperatury T tego ciała określa zależność:

$$M_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (1)$$

gdzie: M_0 – całkowite natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego [W/m^2],

T – temperatura [K],

σ_0 – stała promieniowania ciała czarnego, $\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$].

W odniesieniu do ciał szarych (ciało szare to takie ciało, które pochłania określoną współczynnikiem absorpcji część promieniowania padającego na to ciało, bez względu na długość fali padającego promieniowania i temperaturę ciała) natężenie promieniowania opisane jest wzorem:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad (2)$$

gdzie:

ε – emisyjność całkowita, definiowana jest jako stosunek natężenia promieniowania ciała szarego M do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego M_0 w temperaturze T :

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} \quad (3)$$

Emisyjność całkowita określa stopień czarności ciała ($\varepsilon = 1$ to ciało doskonale czarne, $\varepsilon = 0$ oznacza ciało doskonale białe). Emisyjność (stopień czarności) przybiera wartości $0 < \varepsilon < 1$.

W praktyce współczynnik emisyjności wszystkich ciał rzeczywistych zależy od długości fali padającego promieniowania, jednak w ograniczonym zakresie długości fal wiele ciał może być traktowanych jako ciała szare. W pirometrii wykorzystywane jest promieniowanie temperaturowe w zakresie długości fali od $0,4 \mu\text{m}$ do $20 \mu\text{m}$ (w praktyce od $4 \mu\text{m}$ do $20 \mu\text{m}$), a więc leżące w zakresie podczerwieni i światła widzialnego.

Jeżeli obiekt, którego temperaturę wyznaczamy ma niską emisyjność (materiały o odbłaskowej powierzchni, np. nieoksydowane aluminium, srebro, złoto, chrom, itp.), lub obiekt pomiaru znajduje się w środowisku o wyższej temperaturze, względnie w pobliżu obiektu pomiaru znajduje się źródło wysokiej temperatury, to wynik pomiaru może być zafałszowany poprzez wpływ promieniowania tła w zakresie podczerwieni. W celu kompensacji temperatury tła można stosować następujące metody:

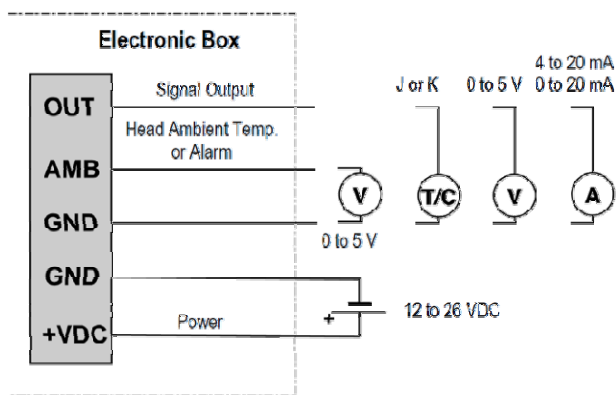
- pomiar temperatury głowicy pirometru za pomocą dodatkowego czujnika wewnętrznego, przy założeniu, że temperatura głowicy jest mniej więcej reprezentatywna dla temperatury tła (jest to domyślny tryb pracy w badanym pirometrze),
- jeżeli temperatura tła jest znana i stała, można uwzględnić ją jako stały składnik korekcyjny w procesie pomiaru,
- kompensację temperatury tła przeprowadzać za pomocą dodatkowego czujnika (bezkontaktowego lub kontaktowego) do pomiaru temperatury tła.

Na rysunku 1 przedstawiono wyprowadzenia sygnałów wyjściowych oraz sposób zasilania pirometru typu MID02 firmy Raytek MI. Pirometr zasilany jest napięciem stałym od 12 V do 26 V. Dostępne są następujące wyjścia sygnałowe:

- wyjście napięciowe 0 V ÷ 5 V (OUT), napięcie jest proporcjonalne do mierzonej temperatury obiektów (skrajne wartości napięcia odpowiadają dolnemu i górnemu zakresowi mierzonych temperatur – w pirometrze ustawiono zakres 0 ÷ 500 °C, co odpowiada czułości pomiaru 10 mV/°C (maksymalny zakres mierzonych temperatur: -40 ÷ 600 °C),
- wyjście prądowe 0 mA ÷ 20 mA lub 4 mA ÷ 20 mA (OUT),
- wyjście z termopary typu J lub K (OUT),
- wyjście napięciowe 0 V ÷ 5 V (AMB), służące do określania temperatury głowicy czujnika (czułość 10 mV/°C, zakres pomiarowy 0 ÷ 500 °C),

przy czym rodzaj wyjścia (OUT) określany jest za pomocą zworek (jumper).

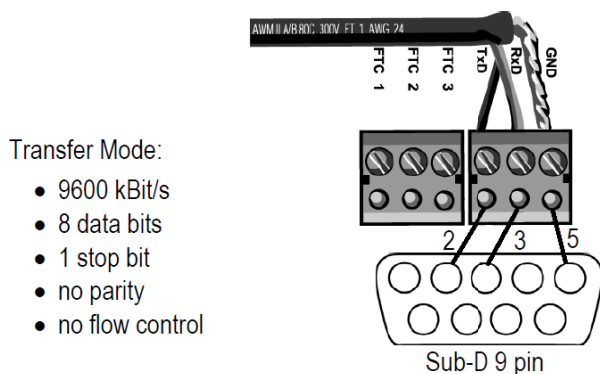
Na rysunku 2 pokazano sposób połączenia pirometru z komputerem za pomocą interfejsu RS-232C oraz parametry transmisji. Obsługa pirometru z wykorzystaniem interfejsu cyfrowego umożliwia zdalną zmianę parametrów pirometru, np. emisyjności oraz akwizycję danych pomiarowych. Ponadto, proporcjonalny do mierzonej temperatury analogowy sygnał napięciowy z pirometru podano na kartę pomiarową, w celu umożliwienia rejestracji z wyższą częstotliwością próbkowania stanów dynamicznych pracy pirometru.



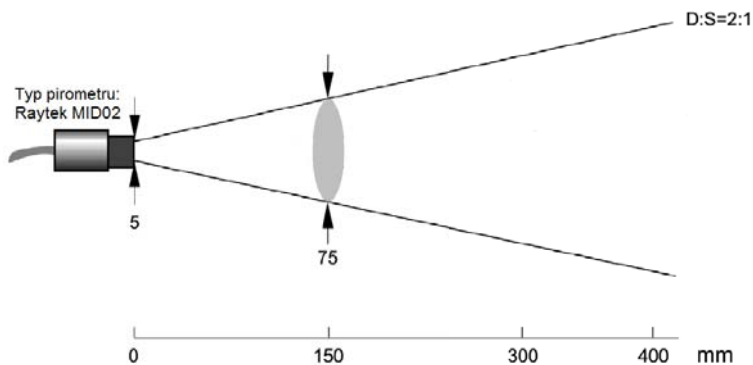
Rys. 1. Sygnały wyjściowe i zasilanie pirometru Raytek typu MID02 [6].

Optyczną rozdzielczość pirometru oraz jego charakterystykę pola czułości pokazano na rysunku 3. Stosowany w ćwiczeniu pirometr ma optyczną rozdzielczość D:S = 2:1 (Distance: Spot – czyli stosunek odległości pirometru od obiektu do średnicy pola pomiarowe-

go temperatury obiektu). Odległość pirometru od obiektu należy dobierać w taki sposób, aby pole pomiarowe w całości mieściło się w obrysie obiektu pomiarowego, w przeciwnym przypadku wynik pomiaru obciążony będzie błędem.



Rys. 2. Sposób podłączenia pirometru Raytek do portu COM komputera [6].



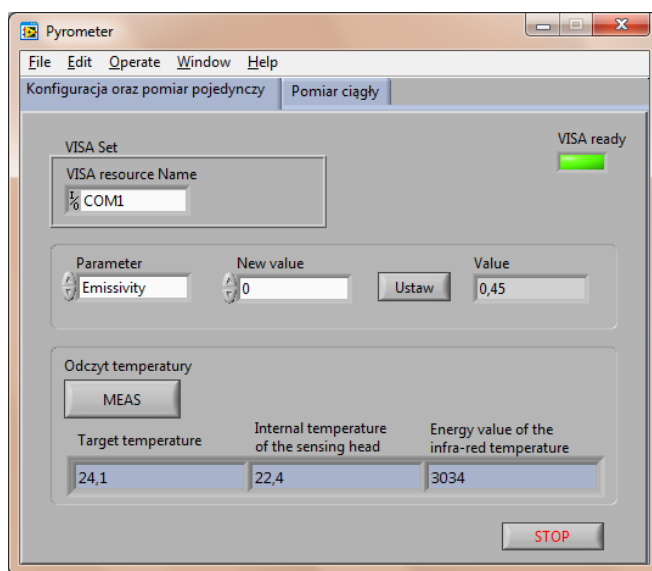
Rys. 3. Charakterystyka pola czułości pirometru typu MID02 [6].

Ad 1a. Wyznaczenie współczynnika emisyjności obiektu pomiaru

Na rysunku 4 przedstawiono wygląd zakładki *Konfiguracja i pomiar pojedynczy* panelu głównego aplikacji obsługującej pirometr przy wykorzystaniu interfejsu RS232C. Aplikacja samodzielnie wyszukuje port, do którego połączony jest urządzenie. Jeżeli automatyczne wyszukiwanie się nie powiedzie, istnieje możliwość ręcznego wyboru portu. W programie istnieje możliwość ustawienia parametrów pracy pirometru: emisyjności, wzmocnienia i offsetu. Należy w tym celu wybrać rodzaj parametru, wpisać nową wartość parametru i wykonać funkcję *ustaw*. Wybranie klawisza *MEAS* powoduje wykonanie pojedynczego pomiaru. W oknach poniżej klawisza pomiaru wyświetlane są wyniki ostatniego

pomiaru: mierzona temperatura obiektu, temperatura głowicy pirometru i wartość energii promieniowania temperaturowego w zakresie podczerwieni.

- Wykorzystując omówioną aplikację wyznaczyć poprawną wartość emisyjności obiektu, którego temperatura jest mierzona. W tym celu wykorzystamy naklejoną na tym obiekcie taśmę o znanej emisyjności odniesienia $\varepsilon_{odn} = 0,96$. Mierzmy temperaturę naklejonej na obiekcie taśmy (przy ustawionej emisyjności ε_{odn}), a następnie kierujemy pirometr na obiekt i dobieramy taką wartość emisyjności, aby wynik pomiaru temperatury obiektu był identyczny jak taśmy (obydwa elementy mają taką samą temperaturę).



Rys. 4. Interfejs użytkownika aplikacji do obsługi pirometru (zakładka *Konfiguracja oraz pomiar pojedynczy*).

Ad 1b. Określenie wpływu współczynnika emisyjności na wynik pomiaru

Wykorzystujemy aplikację z rysunku 4.

- Kierujemy pirometr na obiekt o ustalonej temperaturze (np. na taśmę o znanej emisyjności ε_{odn} naklejoną na obiekcie, którego temperaturę mierzymy) i wykonujemy pomiar temperatury zmieniając wartość współczynnika emisyjności w zakresie od 0,1 do 1,1 co 0,1. Wyznamy charakterystykę "temperatura mierzona" w funkcji emisyjności dla stałej temperatury obiektu mierzonego.
- Kierujemy pirometr kolejno na obiekty mające tę samą temperaturę, lecz wykonane z różnych materiałów. Wartość parametru emisyjności (w aplikacji z rysunku 4) ustawiamy na typową wartość $\varepsilon = 0,95$. Mierzmy temperaturę obiektów za pomocą pirometru i porównujemy ich wartości. Co należy zrobić, aby wynik pomiaru każdego z obiektów (wykonanych z różnych materiałów) był poprawny?

Ad 1c. Wpływ przesłon ograniczających bezpośrednie oddziaływanie promieniowania temperaturowego na pirometr

Kierujemy pirometr na obiekt o ustalonej temperaturze (np. na taśmę o znanej emisyjności ε_{odn} naklejoną na obiekcie, którego temperaturę mierzymy), wartość parametru emisyjności (w aplikacji z rysunku 4) ustawiamy na wartość $\varepsilon_{odn} = 0,96$ i wykonujemy pomiar temperatury. Następnie przesłaniamy drogę optyczną pomiędzy piometrem a obiektem różnymi obiektami, np. płytką szklaną, z tworzywa, pleksiglasu, notujemy wyniki pomiaru temperatury. Należy wyjaśnić przyczynę rozbieżności wyników.

Ad 2. Rejestracja mierzonej temperatury i wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej pirometru

W celu wyznaczenia właściwości dynamicznych pirometru należy zarejestrować jego odpowiedź na skok temperatury. Rejestracji dokonujemy równocześnie w dwóch układach: w aplikacji wykorzystującej transmisję cyfrową za pomocą interfejsu RS232C (rys. 2.1.) oraz rejestrację za pomocą karty pomiarowej z wykorzystaniem aplikacji, którą należy przygotować w środowisku DASYLab.

Na rysunku 5 pokazano okno aplikacji ciągłej rejestracji z transmisją cyfrową danych. Aplikacja obsługuje możliwość startu i zatrzymania pomiaru, czyszczenia bufora danych, doboru częstotliwości próbkowania, oraz zapisu danych do pliku w kodzie ASCII. Ze względu na sposób transmisji danych najkrótszy okres próbkowania wynosi 10 ms.

Rejestracja z wykorzystaniem karty pomiarowej realizowana jest na bazie środowiska programowania graficznego DASYLab. Sposób przygotowania aplikacji pokazano na rys. 6. Zawiera ona blok akwizycji sygnału pomiarowego (Task DA), blok przekształceń matematycznych (Formuła), umożliwiający przeliczenie wartości sygnału napięciowego na wartości temperatury, blok wizualizacji (Y/t Chart) oraz blok zapisu danych do pliku (Write). Przebieg wyznaczenia charakterystyki dynamicznej:

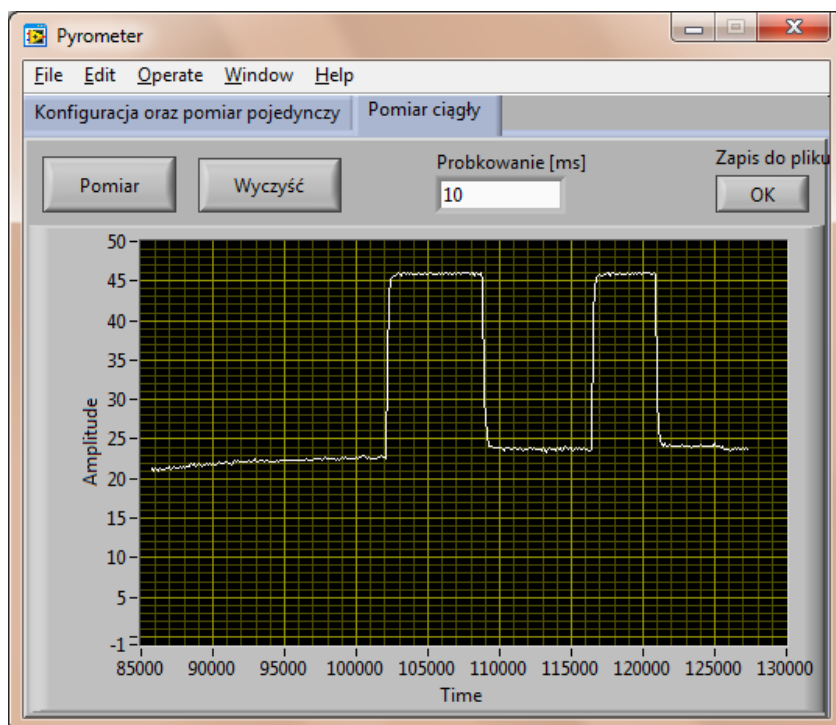
- Kierujemy pirometr na obiekt o ustalonej temperaturze (np. na taśmę o znanej emisyjności ε_{odn} naklejoną na obiekcie, którego temperaturę mierzymy) i uruchamiamy obydwie aplikacje pomiarowe. Po upływie kilku sekund przesłaniamy drogę optyczną pomiędzy piometrem, a obiektem pomiaru, w związku z czym skokowo zmienia się wartość mierzonej przez pirometr temperatury – mierzy on teraz temperaturę przesłony. Rejestrujemy w ten sposób odpowiedź pirometru na ujemny skok temperatury. Po kilku sekundach, gdy odpowiedź pirometru ustabilizuje się odsłaniając drogę optyczną i rejestrujemy odpowiedź pirometru na dodatni skok temperatury. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów wyznaczamy w sprawozdaniu wartości stałych czasowych pirometru (stałą nagrzewania i chłodzenia). Na rysunku 5 pokazano przykład takiej rejestracji.

Ad 3. Nastawianie oraz odczyt parametrów pirometru z wykorzystaniem interfejsu portu szeregowego

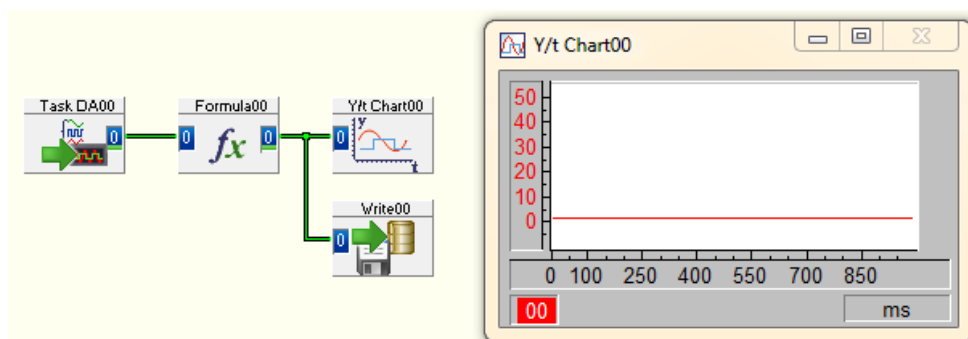
W tej części ćwiczenia zapoznajemy się z możliwością wykorzystania dodatkowych funkcji pirometru dostępnych za pomocą procedur programowych. Wykorzystywane są wówczas przygotowane przez producenta pirometru komendy, które można przysyłać do urządzenia np. za pomocą interfejsu portu szeregowego. W tabeli 1 zestawiono podstawowo-

Ćw. 8 – Badanie właściwości metrologicznych bezstykowego, pirometrycznego...

we tryby pracy pirometru ustawiane za pomocą mikro-przycisków. W tabeli 2 zestawiono przykładowe komendy uruchamiające, za pomocą procedur programowych, zaawansowane funkcje pirometru.



Rys. 5. Interfejs użytkownika aplikacji do obsługi pirometru (zakładka *Pomiar ciągły*).



Rys. 6. Aplikacja do rejestracji dynamicznej odpowiedzi pirometru na skok temperatury.

Tabela 1
Podstawowe tryby pracy pirometru

Wyświetlacz	Tryb pracy	Wybór/Zakres
C	Temperatura obiektu (po przetworzeniu sygnału)	Nie ustawialne
A	Temperatura głowicy	Nie ustawialne
T	Temperatura obiektu (bez przetwarzania sygnału)	Nie ustawialne
	Sygnał wyjściowy (zmiana niektórych sygnałów wymaga zmiany zworek)	mV wyjście w mV (domyślnie) TCK termopara typu K TCJ termopara typu J 4 – 20 wyjście prądowe 4 – 20 mA 0 – 20 wyjście prądowe 0 – 20 mA
E	Emisyjność	0.100 ... 1.000 (domyślnie 0.95)
T	Wsp. transmisyjności	0.100 ... 1.000 (domyślnie 1.000)
A	Uśrednianie pomiarów*	0.100 ... 999.0
P	Podtrzymanie wartości max.*	0.100 ... 998.9 999=∞
V	Podtrzymanie wartości min.*	0.100 ... 998.9 999=∞
L	Dolny zakres pomiarowy	L = -40 ... 600 (domyślnie 0)
H	Górny zakres pomiarowy	H = -40 ... 600 (domyślnie 500)
U	Jednostka	°C, °F (domyślnie °C)

* - nie mogą wystąpić równocześnie

Tabela 2
Zestawienie przykładowych komend

Opis działania	Znak	Format	Wartości dopuszczone
Znak odpytywania	?	?x / ?XX	np. ?T
Identyfikacja urządzenia	XU		!XUMILT2
Numer seryjny	XV		!XV872068
Maksymalna temperatura zakresowa	XH	nnn.n	
Minimalna temperatura zakresowa	XB	nnn.n	
Górna wartość zakresu	H	nnn.n	
Dolna wartość zakresu	L	nnn.n	
Emisyjność	E	n.nnn	0.1 ... 1.1 (domyślnie 0.95)
Temperatura obiektu	T	nnn.n	W bieżącej skali °C lub °F
Temperatura głowicy czujnika	I	nnn.n	W bieżącej skali °C lub °F
Temperatura obudowy urządzenia	XJ	nnn.n	
Jednostka temperatury	U	X	C/F
Power/AD value	Q	nnnn	
Wzmocnienie	DG	n.nnnn	0.8000 ... 1.2000
Offset	DO	nnn	-200 ... 200

Wykaz aparatury

1. Komputer z systemem operacyjnym Windows XP lub wyższym i portem COM,
2. Karta pomiarowa NI6221 wraz z płytką łączeniową,
3. Oprogramowanie DASyLab wraz ze sterownikami do karty (NI-DAQmx),
4. Oprogramowanie do obsługi interfejsu portu szeregowego,
5. Pirometr MID02 wraz z układem zasilania połączony kablem RS232C z komputerem,
6. Obiekty pomiaru temperatury,
7. Kalibrator temperatury wraz z czujnikami: termorezystorem Pt100 i termoparą.

WIZUALIZACJA W SYSTEMACH BIOMEDYCZNYCH

opracował

mgr inż. Mirosław Socha

Ćwiczenie 1

Postrzeganie oraz percepcja obrazu

Program ćwiczenia

1. Percepcja obrazów. Wykonanie testów na ślepotę kolorów, interpretację kolorów, postrzeganie kształtu, złudzenie optyczne, zdolność analizowania obrazu.
2. Wprowadzenie do grafiki komputerowej. Sposoby generowania obrazów (ekran, wydruk) oraz zapisywania obrazów (przestrzenie kolorów, grafika rastrowa i wektorowa).

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawy obsługi programu Matlab.

Literatura

- [1] A. Valberg. *Light Vision Color*. The Norwegian University of Science and Technology. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] J. Zabrodzki. *Grafika komputerowa, metody i narzędzia*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1994.
- [3] A. Zalewski, R. Cegiela. *Matlab - obliczenia numeryczne i ich zastosowania*. Nakom, 1997.
- [4] Dokumentacja programu Matlab: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/creating_plots/bqrw9tj.html

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Percepcja obrazów

Wzrok jest jednym z najważniejszych zmysłów jakie posiadamy. Dostarcza on największej liczby bodźców do naszego mózgu. To dzięki niemu potrafimy rozróżniać kształty i kolory, oceniać odległości oraz wzajemne położenie między obiektami. Na zmysł wzroku składają się oczy, czyli narządy wyspecjalizowane do odbierania sygnałów świetlnych oraz rozległe obszary mózgu, które umożliwiają analizę oraz interpretację informacji docierających z oczu oraz innych zmysłów.

Ponieważ w procesie „patrzenia” uczestniczą różne ośrodki naszego mózgu, ten sam obraz rejestrowany przez oczy różnych osób, może być różnie przez nie interpretowany. Uświadomienie sobie tego faktu jest szczególnie ważne w kontekście graficznej wizualizacji danych, której głównym zadaniem jest dostarczanie obrazów ułatwiających analizę oraz interpretację przedstawianych treści.

Przyczyn odmiennego interpretowania obrazów można szukać zarówno w różnej budowie oka, jak i w sposobie interpretowania obrazu przez mózg. Przykładowo krótkowzroczność może uniemożliwiać zauważenie szczegółów na oddalonej tablicy z wizualizacją, zaś brak lub upośledzenie działania receptorów jednego koloru może prowadzić do niemożliwości rozróżnienia barw. Jak się okaże, podczas wykonywania przygotowanych testów, dość łatwo możemy oszukać nasz sposób postrzegania obrazów. Warto znać „pułapki” jakie czyhają w naszym mózgu, by można je było omijać lub wręcz wykorzystywać, np. do podkreślenia ważnych informacji.

Zadania:

- Wykonaj przygotowany na platformie e-learningowej¹ test na ślepotę kolorów.
- Wykonaj test na interpretację kolorów: wzajemne zależności, rola tła, kontrast, kulturowe znaczenie koloru.
- Wykonaj testy na postrzeganie kształtu, zjawisko złudzenia, uzupełnianie informacji.
- Wykonaj testy na zdolność analizowania obrazu, wyłapywanie szczegółów, zmian.
- Dokonaj analizy wyników testów w kontekście wiedzy teoretycznej. Które zjawiska mają pozytywne, a które negatywne zastosowanie w wizualizacji danych?

Ad 2. Wprowadzenie do grafiki komputerowej

Grafika komputerowa jest działem informatyki, obecnie bardzo szeroko stosowanym w nauce, technice, rozrywce, kulturze i sztuce. Służy zarówno do modyfikowania obrazów rzeczywistych, jak również do tworzenia obrazów zupełnie abstrakcyjnych. Graficzna wizualizacja danych wykorzystuje grafikę komputerową, która jest głównym narzędziem do generowania obrazów umożliwiających prezentację, przeglądanie oraz wykonywanie testów, czy symulacji na podstawie zebranych danych.

Kolejne zadania mają na celu przedstawienie fundamentalnych różnic w plikach wektorowych oraz bitmapach.

Zadania:

- Uruchom program do edytowania grafiki wektorowej (*Inkscape*), a następnie rozmieść na płaszczyźnie ekranu kilka obiektów graficznych (np. okręgów, spiral, linii itp.).
- Zmień kolor wypełnienia oraz konturu przy użyciu zakładki wywołanej z menu: „Obiekt/Wypełnienie i kontur”.

¹ Strona kursu: <http://moodle.cel.agh.edu.pl/weaie/course/view.php?id=406>

- Przy użyciu klawiszy „+” oraz „-” lub trzymając klawisz *ctrl* i obracając rolkę myszki zmień powiększenie rysunku. Czy krawędzie elementów graficznych zawsze pozostają ostre? Czy jakość obrazu zależy od powiększenia?
- Zapisz wyniki swojej „twórczości” do pliku z rozszerzeniem *.svg (menu „Pliki/Zapisz”), a następnie wyeksportuj przygotowaną grafikę do bitmapy w formacie *.png (menu „Pliki/Kolorowa bitmapa”). Porównaj rozmiary plików.
- Otwórz zapisaną bitmapę (plik *.png) w przeglądarce plików graficznych. Czy przy dużych powiększeniach krawędzie nadal są ostre? Jaką rozdzielczość ma wygenerowany plik?
- Jaką rozdzielczość powinien mieć plik typu czarno-biała bitmapa, przedstawiający grafikę wielkości kartki formatu A4, jeśli miałby być wydrukowany na drukarce laserowej o rozdzielczości 300 punktów na cal? Zakładamy, że chcemy maksymalnie wykorzystać rozdzielczość drukarki.
- Jaką rozdzielczość powinien mieć plik bitmapy z tą samą grafiką, który ma być umieszczony w prezentacji wyświetlanej na ekranie komputera?

Zadaniem grafiki komputerowej w wizualizacji jest zazwyczaj tworzenie obrazów barwnych, które są prezentowane na monitorach lub drukowane. Z zastosowanej techniki prezentacji wynikają dwa podstawowe opisy kolorów: system RGB dla urządzeń „świeących”, takich jak monitory czy rzutniki oraz system CMYK w urządzeniach drukujących. Oprócz modeli opisu koloru bazujących na sprzęcie, powstały również inne systemy, np. HSV ułatwiające sterowanie kolorem.

Poniższe zadania mają na celu zapoznanie się z różnymi systemami kodowania kolorów oraz dostępnymi w programie Matlab narzędziami do konwersji przestrzeni barw.

Zadania:

- Uruchom program Matlab, a następnie wczytaj przygotowany zestaw plików testowych. Pliki należy pobrać z platformy e-learningowej, ze strony kursu.
- Użyj funkcji *iminfo()*, aby określić podstawowe parametry plików graficznych.
- Przy pomocy funkcji *imshow()* przedstaw poszczególne składowe kolorów na oddzielnych obrazach w skali szarości. Jakie praktyczne zastosowanie ma czwarty kanał K zastosowany w kodowaniu CMYK w porównaniu z kodowaniem CMY?
- Sprawdź działanie funkcji *rgb2ind()* oraz *ind2rgb()* dokonując konwersji obrazów. Jak zmienia się cyfrowa reprezentacja obrazów?
- Odszukaj w dokumentacji programu Matlab funkcje umożliwiające konwersję kolorów RGB do przestrzeni HSV. Zastosuj konwersję na wybranym obrazie, porównaj otrzymane składowe z wcześniejszymi obrazami.
- Wykorzystując funkcję histogramu (*hist()*) sprawdź, w których kanałach znajduje się najwięcej informacji. Czy konwersja przestrzeni kolorów wpływa na rozmieszczenie danych w kanałach?
- Dokonaj konwersji kolorowego obrazu do obrazu monochromatycznego (w odcieniach szarości). Użyj wzoru na wyliczenie luminancji obrazu, porównaj wyniki z prostym uśrednieniem składowych obrazu. Wyjaśnij różnice.

- Wygeneruj obraz przedstawiający płynne przejście między czernią i bielą, czerwonym i niebieskim kolorem oraz wszystkimi kolorami tęczy. Zastosuj funkcję *linespace()* oraz funkcje do konwersji przestrzeni kolorów. Przedstaw wyniki w postaci rysunku. Czy liniowa zmiana współczynników odpowiada wrażeniu liniowej zmiany koloru?
- Zapoznaj się z dokumentacją funkcji *makecform()*. Wykorzystaj ją do konwersji obrazu RGB do przestrzeni kolorów niezależnych od sprzętu (*device-independent color spaces*), takich jak CIE XYZ oraz CIE LAB. Jakie praktyczne zastosowania mają te przestrzenie barwne?

Ćwiczenie 2

Prezentacja danych jedno i wielowymiarowych

Program ćwiczenia

1. Przykłady odczytu i zapisu popularnych formatów danych:
 - a) pliki CSV,
 - b) pliki XML,
 - c) pliki DICOM.
2. Podstawowe metody wizualizacji danych:
 - a) prezentacja danych pomiarowych,
 - b) wizualizacja wielu serii danych – wsadowe tworzenie wykresów.
3. Metody wizualizacji danych wielowymiarowych:
 - a) dane dwuwymiarowe – obrazy cyfrowe,
 - b) dane wielowymiarowe – przebiegi czas-częstotliwość-amplituda
 - c) dane tensorowe.

Zakres wymaganych wiadomości

Znajomość programu Matlab. Podstawy statystycznej analizy danych oraz przetwarzania sygnałów.

Literatura

- [1] A. Zalewski, R. Cegiela. *Matlab - obliczenia numeryczne i ich zastosowania*. Nakom, 1997.
- [2] Dokumentacja opisująca formaty plików wykorzystywane przez bibliotekę VTK: <http://www.vtk.org/VTK/img/file-formats.pdf>
- [3] Standard DICOM: <http://medical.nema.org>
- [4] Dokumentacja biblioteki gdcm: http://sourceforge.net/apps/mediawiki/gdcm/index.php?title=Main_Page

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Przykłady odczytu i zapisu popularnych formatów danych

Najprostszą i najbardziej popularną formą przechowywania cyfrowych danych są pliki, czyli zbiory danych stanowiące jedną całość. Istnieje ogromna liczba typów plików,

które mogą służyć do przechowywania najróżniejszych danych. O strukturze wewnętrznej pliku decyduje *format pliku*, czyli zestaw reguł ściśle definiujących sposób tworzenia, zapisu oraz odczytu informacji zawartych w pliku. Można wyróżnić *formaty otwarte*, których definicja jest publiczna, dostępna dla wszystkich zainteresowanych oraz *formaty zamknięte*, chronione zazwyczaj przez twórców. Zwyczajowo przyjmuje się, że format pliku rozpoznaje się przez rozszerzenie, czyli ostatnią część nazwy pliku. Należy pamiętać jednak, że rozszerzenie nie definiuje wewnętrznej budowy pliku.

W systemach informatycznych pliki można podzielić na dwie grupy: pliki tekstowe, które składają się z tekstu (ograniczonego zestawu znaków np. ASCII lub Unicode) oraz pliki binarne, które mogą zawierać dowolne znaki. Podział ten nie ma znaczenia dla systemu informatycznego, ale ma znaczenie dla ewentualnego użytkownika. Pliki tekstowe są zazwyczaj sformatowane w taki sposób, by możliwa była łatwa interpretacja oraz zmiana ich zawartości w dowolnym programie typu edytor tekstu. Pliki binarne są przeznaczone do odczytu przez konkretne programy, potrafiące zinterpretować zawartość takich plików.

W praktyce wyniki pracy z oprogramowaniem naukowym trafiają do „jakiegoś” pliku i zazwyczaj jest to plik w formacie zamkniętym. Bardzo często zdarza się, że wyniki te trzeba wczytać do innego programu, który niekoniecznie jest w stanie odczytać nasze dane. Z pomocą wówczas przychodzą pewne *standardowe formaty plików*, które stosuje się ze względu na ich prostą budowę (plik tekstowy *.txt), dobrą dokumentację (pliki w standardzie XML), czy też dużą popularność (*.doc).

Pliki CSV (ang. *Comma Separated Values*) to pliki tekstowe, w których poszczególne wartości rozdzielane są przecinkiem. Ze względu na prostą budowę oraz dużą elastyczność format ten jest często stosowany do wymiany informacji, które można zapisać w tabeli. Wówczas poszczególne wiersze pliku zawierają jeden zestaw (rekord) danych, które rozdziela się za pomocą przecinka lub ewentualnie innego znaku przystankowego (np. dwukropka, średnika czy tabulatora).

Zadania:

- Odszukaj w internecie dokumentację formatu CSV. Czy istnieją różne wersje tego standardu?
- Przy pomocy edytora tekstu otwórz przykładowy plik *test01.csv* (dostępny na stronie kursu platformy e-learningowej²). Jakie informacje zawiera? Czy spełnia założenia standardu CSV?
- Wczytaj plik *test01.csv* do arkusza kalkulacyjnego (OpenOffice Calc).
- Sformatuj komórki z danymi, w taki sposób, by analiza ich zawartości była łatwiejsza. Z jakich technik ułatwiających percepcję danych skorzystałeś?

Pliki XML są to pliki tekstowe zawierające dane zakodowane przy pomocy uniwersalnego języka formalnego jakim jest XML (ang. *Extensible Markup Language*). Język ten jest niezależny od platformy (systemu operacyjnego, a także sprzętu), co w znakomity sposób ułatwia wymianę danych zapisanych w takich plikach. Dzięki zastosowaniu *znac-*

² Strona kursu: <http://moodle.cel.agh.edu.pl/weaie/course/view.php?id=406>

ników język XML umożliwia przechowywanie danych związanych ze sobą w dowolny sposób.

Istnieje wiele formatów plików opartych na XML, jak na przykład pliki z grafiką wektorową SVG (*Scalable Vector Graphics*), pliki pakietów biurowych w formacie ODF (*OpenDocument Format*), czy pliki internetowych stron www XHTML, zawierające kod HTML zgodny z XML. Ponieważ pliki te są zazwyczaj plikami tekstowymi, możliwa jest ich łatwa modyfikacja, zarówno ręczna (w edytorze plików), jak i proceduralna.

Biblioteka VTK wykorzystuje między innymi język XML do przechowywania danych. Szczegółowy opis znajduje się w dokumencie <http://www.vtk.org/VTK/img/file-formats.pdf>. Pliki tego typu zostaną wykorzystane do wymiany danych w kolejnych ćwiczeniach.

Zadania:

- Otwórz plik *test02.xml* w edytorze tekstu. Jakie informacje zawiera?
- Otwórz plik *test03.svg* w przeglądarce www oraz edytorze tekstu. Czy potrafisz zmienić kolor i wielkość tekstu?

Pliki w formacie DICOM [2] (ang. *Digital Imaging and Communications in Medicine*) służą głównie do wymiany informacji graficznych w systemach medycznych PACS (ang. *Picture Archiving and Communication Systems*). Standard został opracowany przez *American College of Radiology* (ACR) oraz *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) w postaci norm dostępnych pod adresem <ftp://medical.nema.org/medical/dicom/2008/>. Standard ten został opracowany dla celów sieciowej wymiany informacji, jednak definiuje on również wymianę poprzez pliki. Są to pliki binarne, zawierające strumień informacji (*DataSet*), który jest uporządkowanym strumieniem elementów danych (*DataElement*), stanowiących podstawową jednostkę informacji. Szczegółowy opis standardu DICOM znajduje się na stronie <http://home.agh.edu.pl/~socha/pmwiki/pmwiki.php/DICOM> oraz na stronie kursu.

Osoby zainteresowane analizą danych medycznych, a w szczególności obrazami medycznymi, np. z tomografii komputerowej czy rezonansu magnetycznego, bardzo szybko spotkają się z plikami w formacie DICOM. Pliki te są zazwyczaj zapisywane po wykonaniu badania na płytach CD i przekazywane pacjentom jako dokumentacja medyczna. Istnieje duża liczba różnego rodzaju oprogramowania, które umożliwia przeglądanie plików DICOM. Do analizy danych zawartych w plikach medycznych wykorzystany zostanie program Matlab oraz narzędzia biblioteki *gdcm* [4].

Zadania:

- Uruchom program Matlab, a następnie odszukaj w dokumentacji programu wszystkie funkcje służące do obsługi plików DICOM.
- Przeanalizuj zawartość pliku *dane01.dcm*. Jakie dane są zapisane w pliku? Czy jest to jedynie plik graficzny?
- Wczytaj plik *dane01.dcm*, a następnie wyświetl jego zawartość graficzną przy użyciu funkcji *imshow()*.

- Uruchom konsolę i wywołaj program `gdcmdump dane01.dcm`. Zapisz wyniki działania programu do pliku. Porównaj uzyskane informacje z informacją o zawartości pliku uzyskaną w Matlabie.

Ad 2. Podstawowe metody wizualizacji danych

a) Prezentacja danych pomiarowych

Głównym celem tego ćwiczenia jest graficzne przedstawienie przykładowych wyników pomiarów, w taki sposób, by były one jak najłatwiejsze w interpretacji. W tym celu wykorzystane zostaną możliwości arkusza kalkulacyjnego, takie jak: formatowania danych oraz tworzenia wykresów.

Zadania:

- Uruchom arkusz kalkulacyjny, a następnie wczytaj plik `rejestracjaXX.csv`.
- Przygotuj wykres do umieszczenia na stronie A4 (wydruk laserowy, bezbarwny) oraz drugą wersję do umieszczenia w prezentacji (rozdzielczość 1024x768 pikseli). Na co trzeba zwrócić szczególną uwagę?
- Oblicz, a następnie dodaj do danych prostą regresji, oblicz odchylenie standardowe danych pomiarowych, a następnie zaznacz na wykresie zakres zmienności wartości.
- Przyjmując, że dokładność przyrządu wynosi 1% oblicz obszar, w którym dane mogą się znajdować. Przedstaw wyniki w postaci graficznej.
- Oblicz histogram danych, przedstaw go na wykresie.

b) Wizualizacja wielu serii danych – wsadowe tworzenie wykresów

Często zdarza się, że niezbędne jest przygotowanie serii wizualizacji dla wielu zestawów danych, np. wielu serii pomiarowych. W takim przypadku należy wykorzystać zalety środowiska umożliwiającego przetwarzanie wsadowe, jak np. Matlab. W tym ćwiczeniu powstanie skrypt, którego zadaniem będzie przygotowanie serii wizualizacji danych do wydruku na kolorowej drukarce. Zastosowane zostaną niskopoziomowe funkcje graficzne pakietu Matlab, takie jak funkcja `set()` oraz `get()`.

Zadania:

- Uruchom program Matlab, a następnie zapoznaj się z narzędziem `plottools`.
- Wczytaj plik `seria01.txt` do Matlab, zawierający wyniki skalowania czujnika.
- Wykorzystaj funkcję `plot`, do zapoznania się z zawartością pliku.
- Napisz skrypt (m-funkcję), którego zadaniem będzie:
 - wczytanie zadanego pliku,
 - narysowanie punktów pomiarowych,
 - obliczenie oraz narysowanie wygładzonego funkcją `smooth()` przebiegu zmian sygnału pomiarowego,
 - zmienianie skali osi rzędnych i odciętych na zadany przedział,
 - dodanie tytułu oraz opisu osi,

- zmiana parametrów wykresu (grubość, kolor oraz styl linii).
- Wykorzystaj stworzony skrypt do wizualizacji serii danych zapisanych w plikach *seriaXX.txt*.

Ad 3. Metody wizualizacji danych wielowymiarowych

a) Dane dwuwymiarowe – obrazy cyfrowe

Dane wielowymiarowe wymagają zastosowania bardziej zaawansowanych technik prezentacji. W przypadku obrazów, poza informacją o przestrzennym położeniu piksela, niezbędne jest jeszcze przekazanie informacji o jego „wartości”. W tym celu stosuje się kodowanie informacji w postaci koloru. W przypadku obrazów cyfrowych, np. pozyskanych cyfrowym aparatem fotograficznym, takie kodowanie jest naturalne. Jednak istnieją obrazy, takie jak np. termogramy czy obrazy medyczne, w których konkretny kolor stanowi wartość umowną.

Zadania:

- Wczytaj do programu Matlab funkcją *imread()* pliki graficzne: *image01.bmp ... image06.bmp*. Jakie wymiary mają macierze odpowiadające kolejnym plikom? O czym to świadczy?
- Przy pomocy funkcji *imshow()* wyświetl wczytane pliki, a następnie użyj kursora, by odczytać wartości pikseli. Jakich dodatkowych informacji dostarcza kursor?
- Zmień paletę barw funkcją *colormap*, dodaj pasek kolorów funkcją *colorbar*.
- Wczytaj do programu Matlab termogram zapisany w pliku *termogram.xls*. Przedstaw dane w postaci graficznej, wyznacz maksymalną oraz minimalną temperaturę, a następnie profil zmian temperatury między tymi wartościami (funkcja *improfile()*).
- Wczytaj do Matlaba obrazy medyczne zapisane w formacie DICOM: *dane02.dcm* oraz *dane03.dcm*. Jakie badania przedstawiają te dane?
- Jaki jest zakres wczytanych danych? W jaki sposób można pokazać cały zakres zmienności danych?
- Dobierz zakres prezentowanych danych, w taki sposób, by można było rozróżnić strukturę tkanki kostnej.
- Przetestuj różne palety barw (*colormap*). Jak one wpływają na czytelność danych?
- Użyj funkcji *colormapeditor* do stworzenia własnej palety barw. Zaznacz przy pomocy kontrastowych kolorów tkanki miękkie (mięśnie) oraz kości.

b) Dane wielowymiarowe – przebiegi czas-częstotliwość-amplituda

Innym przykładem danych wielowymiarowych są analizy czasowo-częstotliwościowe. W środowisku Matlab można wykonać analizę sygnału dwuwymiarowego (np. dźwięku) funkcją *spectrogram()*. Wynikiem jest amplituda harmonicznego sygnału w kolejnych chwilach czasu.

Zadanie:

- Wczytaj pliki dźwiękowe (*wavread*): *a.wav*, *sz.wav*.
- Wyznacz krótkoczasową transformatę Fouriera przy pomocy funkcji *spectrogram()*.
- Przedstaw obliczenia w formie graficznej przy pomocy różnych wykresów 3D. Który sposób jest najbardziej czytelny? Który ułatwia rozróżnienie głoski dźwięcznej od bezdźwięcznej?

c) Dane tensorowe

Kolejną klasą danych spotykanych w zastosowaniach inżynierskich są informacje o charakterze tensorowym. Przykładem mogą być wyniki symulacji w mechanice płynów. W wyniku obliczeń uzyskuje się informacje skalarne (tensor zerowego rzędu), np. o rozkładzie temperatur lub ciśnienia oraz informacje wektorowe (tensor pierwszego rzędu), np. o kierunku przepływu medium. Innymi przykładami danych o charakterze tensorowym są pseudowektory (wektory osiowe), czyli wielkości będące wynikiem iloczynu wektorowego, takie jak np. momenty pędu czy prędkości kątowe. W mechanice spotyka się również tensory drugiego rzędu, takie jak tensory odkształceń oraz naprężeń, zaś w teorii względności występuje tensor pola elektromagnetycznego.

W celu poznania możliwości wizualizacji pola wektorowego w środowisku Matlab, wykorzystane zostaną dane przedstawiające przestrzenne pole wektorowe obrazujące przepływ wiatru.

Zadania:

- Wczytaj dane do programu Matlab przy pomocy komendy *load wind*.
- Użyj funkcji *imagesc()* do wizualizacji wybranych przekroi przez dane. Jakie dane zawierają poszczególne macierze?
- Odszukaj w dokumentacji funkcje do wizualizacji pól wektorowych, przetestuj ich działanie na wczytanych danych. Które metody ułatwiają interpretację danych?
- Oblicz moduł prędkości wiatru, przedstaw go w postaci graficznej dla przekroju (na płaszczyźnie) oraz dla całych danych.
- Odszukaj w danych miejsce, w którym powstaje „tornado”, przedstaw go w postaci graficznej. Wskaż obszary w przestrzeni o największej prędkości.
- Użyj funkcji *streamparticles()* do przedstawienia teoretycznego ruchu cząsteczek w obszarze tornada.

Ćwiczenie 3

Wizualizacja danych w programie ParaView

Program ćwiczenia

1. Wprowadzenie do obsługi programu ParaView:
 - a) interfejs użytkownika,
 - b) wykorzystanie filtrów do przetwarzania i wizualizacji danych.
2. Import danych oraz przegląd metod prezentacji danych:
 - a) dane w uniwersalnych formatach,
 - b) dane wielowymiarowe,
 - c) dane medyczne.
3. Przykład wizualizacji dużego zbioru danych medycznych.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowe metody wizualizacji danych.

Literatura

- [1] A. H. Squillacote. *The Paraview Guide*. Kitware, 2007.
- [2] Dokumentacja do programu ParaView: <http://www.paraview.org>
- [3] Dokumentacja typu wiki: <http://paraview.org/Wiki/ParaView>
- [4] W. Schroeder, K. Martin, B. Lorensen. *The Visualization Toolkit*. Kitware, 1996.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wprowadzenie do obsługi programu ParaView

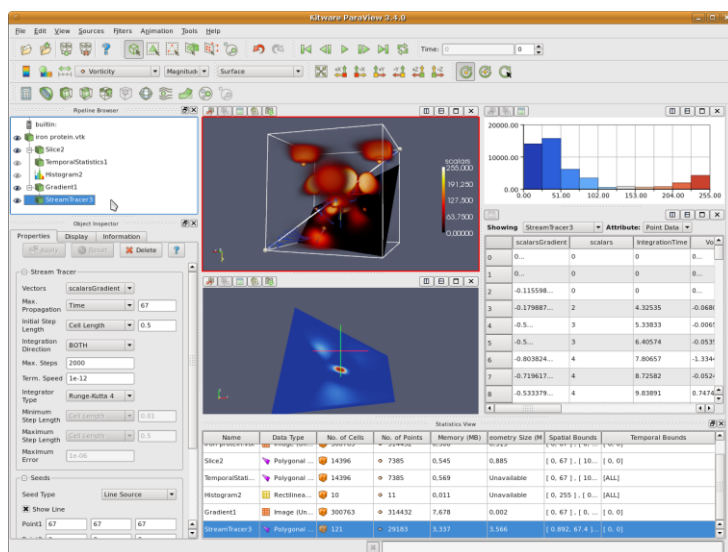
Program ParaView umożliwia wizualizację oraz analizę dużych zbiorów danych, dzięki wykorzystaniu mocy obliczeniowej wielu komputerów. Dostępny jest na wielu platformach zarówno systemowych (Unix, Windows, Mac OS X), jak i sprzętowych (komputery klasy PC, klastry obliczeniowe, superkomputery). Aplikacja jest typu *open source*, czyli dostępny jest pełny kod źródłowy programu. Do wizualizacji wykorzystywana jest biblioteka VTK. ParaView umożliwia tworzenie własnych rozszerzeń (tzw. filtrów) do analizy

i prezentacji danych, posiada również wbudowany interpreter języka Python. Ze względu na duże możliwości konfiguracji oraz rozbudowy program wart jest poznania.

Praca z programem polega na połączeniu oraz skonfigurowaniu zbioru obiektów w tzw. *strumień przetwarzania danych*. Na początku tego strumienia znajdują się *źródła danych*, którymi mogą być zarówno obiekty wczytujące dane z plików (menu *File/Open*), jak i obiekty generujące dane (menu *Sources*). Kolejnym elementem *strumienia* są filtry (menu *Filters*), których głównym zadaniem jest przetwarzanie danych. Wyniki obliczeń filtrów mogą być źródłem danych dla innych filtrów. Łącząc i konfigurując odpowiednie filtry można dokonywać bardzo skomplikowanych analiz oraz wizualizacji danych.

a) Interfejs użytkownika

Program ParaView ma rozbudowany i intuicyjny interfejs użytkownika. Przykładowy ekran z działającą aplikacją przedstawiono na rysunku. 1.



Rys. 1.: Interfejs użytkownika programu ParaView.

W interfejsie programu można wyróżnić kilka głównych elementów:

- Menu oraz belki z ikonami ułatwiającymi dostęp do najczęściej używanych opcji oraz filtrów.
- Panel *Pipeline Browser*, w którym przedstawiany jest aktualny strumień przetwarzania i przesyłu danych między obiektami oraz ich wzajemne zależności.
- Panel *Object Inspector*, prezentujący parametry obiektu aktualnie wybranego w panelu *Pipeline Browser*. Umożliwia on wprowadzenie nowych nastaw parametrów obiektu, ich zatwierdzenie, a tym samym wyzwolenie nowych obliczeń.

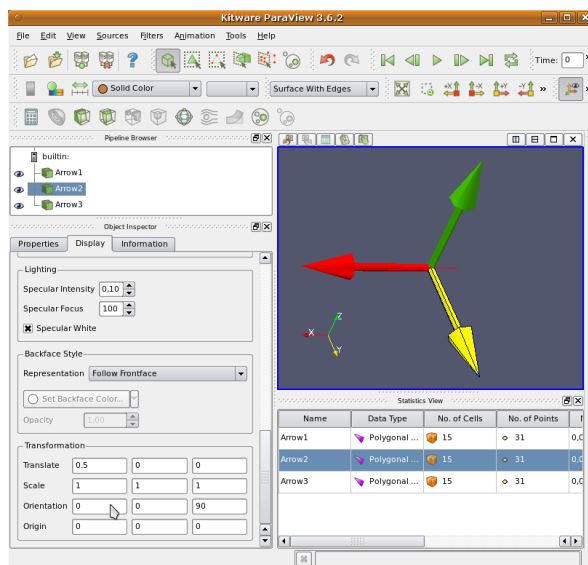
- Panel *Statistic View* zbiorczo prezentujący podstawowe parametry wszystkich obiektów występujących w strumieniu przetwarzania danych.
- Panele do prezentacji danych, zarówno w postaci graficznej, jak i w postaci tabel z wynikami obliczeń.

Każdy panel do wizualizacji można podzielić używając ikon *Split Horizontal* i *Split Vertical*, znajdujących się po prawej stronie każdego okienka z wizualizacją. Po podzieleniu możliwe jest wybranie czterech trybów graficznej prezentacji danych: 3D, 2D, wykres typu słupkowego (*Bar Chart*) oraz wykres typu XY (*XY Plot*). Istnieją też specjalne wersje tych okien (*Comparative*), umożliwiające porównywanie różnych nastaw parametrów obiektów. Poza prezentacją graficzną możliwe jest również przeglądanie danych w oknie typu arkusz kalkulacyjny (*Spreadsheet View*). W oknie tym można wybrać obiekt poprzez rozwijane menu *Showing* oraz konkretne dane *Attribute*, które będą wyświetlane.

Do sterowania położeniem kamery w oknach z wizualizacją służą kombinacje trzech klawiszy myszki (lewego, środkowego oraz prawego) oraz klawiszy *shift* i *control*. Menu *Camera Controls* zawiera ikony umożliwiające szybki reset kamery, powiększenie konkretnego fragmentu wizualizacji oraz ustawienie kamery w konkretnym kierunku.

Zadania:

- Należy uruchomić program ParaView, a następnie wywołać okno z dokumentacją programu przez wciśnięcie klawisza F1, naciśnięcie ikonki ze znakiem zapytania lub wybranie z menu *Help/Help*. Należy zapoznać się z organizacją oraz zawartością pomocy do programu.
- Wybierając z menu: *Source/Arrow* należy dodać do potoku wizualizacji obiekt reprezentujący przestrzenną strzałkę. Po wybraniu z menu obiektu, w tym przypadku strzałki, należy dokonać ewentualnych modyfikacji parametrów, a następnie zatwierdzić je klawiszem *Apply* – wówczas obiekt pojawi się w oknie wizualizacji.
- Zapoznając się ze stroną *Views* w dokumentacji, należy dodać drugie okno wizualizacji 3D, a w nim zaprezentować strzałkę pod innym kątem. Używając prawego klawisza myszki należy połączyć widoki z dwóch kamer (*Link camera...*), w taki sposób, by zmiana widoku w jednym oknie powodowała zmianę również w drugim.
- Kolejnym krokiem będzie zbudowanie z trzech różnokolorowych strzałek wskaźnika osi. Na rysunku 2 przedstawiono wynik jaki powinien zostać osiągnięty. Wzorzec takiego wskaźnika można włączyć wybierając w menu *View/Show Orientation Axes*. Strzałka czerwona powinna wyznaczać kierunek dodatni osi OX, żółta kierunek OY, a zielona OZ. W tym celu należy dodać trzy strzałki (*Source/Arrow*), zmienić im kolor (zakładka *Display:Color:Color by...*). Następnie, posługując się współczynnikami transformacji (zakładka *Display:Transformation*), należy zwrócić strzałki w odpowiednim kierunku. Zakładka *Display:Transformation* umożliwia określenie punktu (tzw. *Origin*), względem którego dokonywane będą przesunięcia, skalowania oraz obroty. Czy wprowadzane transformacje dla konkretnych obiektów (strzałek) mają wpływ na obydwa okienka z wizualizacją?



Rys. 2. Wskaźnik osi zbudowany przy pomocy trzech strzałek.

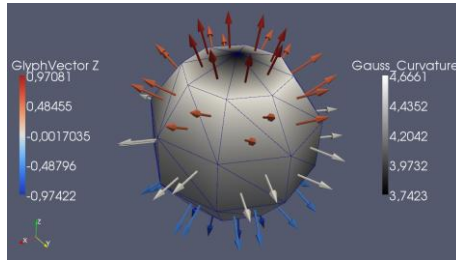
b) Wykorzystanie filtrów do przetwarzania i wizualizacji danych

Ogromną siłą programu są filtry, których listę można zobaczyć rozwijając menu *Filters/Alphabetical*. Filtry umożliwiają potokowe przetwarzanie danych – każdy filtr posiada wejście oraz wyjście. Łącząc proste filtry ze sobą można dokonywać skomplikowanych analiz oraz wizualizacji.

Przed dodaniem filtru do konkretnego obiektu (źródła danych) należy obiekt ten zaznaczyć w panelu *Pipeline Browser*. Dla wybranego obiektu aktywne są jedynie „kompatybilne” filtry, czyli takie, które są w stanie pobrać jakieś dane z obiektu. Dlatego np. filtr wymagający danych wektorowych nie będzie aktywny, gdy wybierzemy obiekt „wystawiający” dane skalarne.

Rysunek 3 prezentuje przykład zastosowania dwóch filtrów do obiektu typu parametryczna kula. Jeden filtr obliczył krzywiznę (*Curvature*), a drugi zaznaczył strzałkami (*NormalGlyphs*) wektory normalne do powierzchni poszczególnych trójkątów tworzących kulę. Dodatkowo przypisano palety kolorów do prezentacji krzywizny oraz wartości składowej Z wektora normalnego.

Każdy obiekt w strumieniu wizualizacji posiada w zakładce *Display* sekcję *Color*, w której można określić jakie dane zostaną zakodowane w kolorach konkretnego obiektu. W najprostszym przypadku, może to być stały kolor, można również przypisać wartość skalarną, w powyższym przykładzie była to wyliczona krzywizna. Kolor strzałek odpowiada jednej składowej wielkości wektorowej, w tym przypadku składowej Z wektora normalnego.



Rys. 3. Przykład zastosowania filtrów.

W zakładce *Display/Style* możliwe jest również sterowanie sposobem wizualizacji danych. W zależności od obiektu, dostępne są tryby:

1. *Outline*, czyli wizualizacja jedynie „zarysu pudełka”, w którym dane się „mieszczą”,
2. *Points*, wyświetlane są jedynie punkty,
3. *Wireframe*, prezentowane są połączenia między punktami,
4. *Surface*, tworzone są wypełniane kolorem trójkąty, z których zbudowana jest powierzchnia,
5. *Volume*, wizualizacja w postaci półprzezroczystej „chmury”, umożliwiająca „patrzenie przez dane”,
6. *Slice*, dane przestrzenne prezentowane są w postaci dwuwymiarowego przekroju.

Zadania:

- Odtwórz rysunek 2 dodając do obiektu *Sources/Sphere* filtr obliczający krzywiznę powierzchni (*Curvature*). Zastosuj filtr (*NormalGlyphs*) do przedstawienia wektorów normalnych.
- Zmodyfikuj sferę dodając filtr *Transform*. Czy kolejność filtrów ma znaczenie? Zmodyfikuj kolejność klikając prawym klawiszem na wybranym filtrze i wybierz opcję *Change Input...*
- Przetestuj działanie ikonki sterującej kamerą. Na czym polega działanie funkcji *Pick Center*?
- Dodaj do strumienia obiekt *Sources/Wavelet*. Do wizualizacji użyj okna *3D View Comparative* (dostępne po podzieleniu okna) oraz *Comparative View Inspector* do zmieniania parametrów obiektu. Przetestuj działanie wizualizacji wolumetrycznej (*Volume*), przekrojów przez dane (*Slice*), oraz innych filtrów.

Ad 2. Import danych oraz przegląd metod prezentacji danych

Program ParaView obsługuje wiele formatów plików z danymi. Umożliwia wczytywanie danych w postaci uniwersalnych plików CSV i RAW, danych medycznych DICOM oraz wyników symulacji.

Zadania:

a) dane w uniwersalnych formatach:

- Wczytaj dane w formacie CSV używane w poprzednich ćwiczeniach, wykorzystaj możliwości ParaView do prezentacji tych danych.
- Porównaj możliwości programu ParaView z Matlabem.

b) dane wielowymiarowe:

- Wczytaj plik *blunfin.vts*. Jakie dane znajdują się w pliku?
- Wykorzystaj możliwości programu ParaView do wizualizacji wczytanych danych. Porównaj możliwości programu ParaView z Matlabem.
- Użyj okna *View/Animation View* do stworzenia animacji przesuwanego przekroju (filtra *Slice*)
- Otwórz plik *can.ex2*, użyj okna *Animatin View* do sterowania animacją zgniatania walca. Przetestuj działanie filtrów *Plot Data* oraz *Plot Selecion over Time* dla zaznaczonych wierzchołków siatki. Przedstaw zmianę prędkości w funkcji czasu dla wybranego wierzchołka.

c) dane medyczne:

- Wczytaj plik *dane01.pdb*. Jakiego typu informacje zawiera plik? Otwórz plik w edytorze tekstu. Jaki format mają dane?
- Użyj filtrów *Generate Tubes* oraz *Glyph*. Czy ich zastosowanie zwiększyło czytelność danych?
- Wczytaj dane z tomografii komputerowej zapisane w postaci serii plików RAW (dane bez nagłówka) spakowane w pliku *headsq.zip*. Użyj filtru *Contour* do zrekonstruowania powierzchni kości oraz tkanek miękkich. Do określenia wartości progów użyj filtra *Plot over Line*.
- Przedstaw dane w postaci renderingu³ wolumetrycznego, przy użyciu okna *Color Scale Editor*. Dobierz skalę kolorów tak, by widoczne były wszystkie główne organy wewnętrzne (zmodyfikuj liczbę węzłów, ich kolor oraz przezroczystość).
- Porównaj możliwości wizualizacji danych medycznych przy pomocy izopowierzchni oraz renderingu objętościowego.

Ad 3. Przykład wizualizacji dużego zbioru danych medycznych

Program ParaView powstał do wizualizacji dużych zbiorów danych. Podczas tego ćwiczenia powstanie wizualizacja wnętrza klatki piersiowej.

Zadania:

- Wczytaj dane zapisane w formacie DICOM (plik *dicom.zip*), zastosuj filtr *Contour* do zrekonstruowania powierzchni drzewa oskrzelowego (granicy między powietrzem oraz tkanką).

³Rendering - algorytmy przetwarzania danych, zarówno programowe jak i sprzętowe, w wyniku działania których powstaje obraz cyfrowy.

- Użyj filtra *Extract Subset* w celu ograniczenia (przycięcia) danych do okolic tchawicy oraz płuc.
- Użyj renderingu wolumetrycznego do wizualizacji drzewa oskrzelowego, dobierz zakres kolorów, w taki sposób, by widoczne były jedynie ściany drzewa oskrzelowego.

Ćwiczenie 4

Objętościowa prezentacja danych medycznych - program VolView

Program ćwiczenia

1. Wprowadzenie do obsługi programu VolView.
2. Dobór parametrów funkcji przejścia (*transfer function*).

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawy anatomii człowieka.

Literatura

- [1] W. Schroeder, K. Martin, B. Lorensen. *The Visualization Toolkit*. Kitware, 1996.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

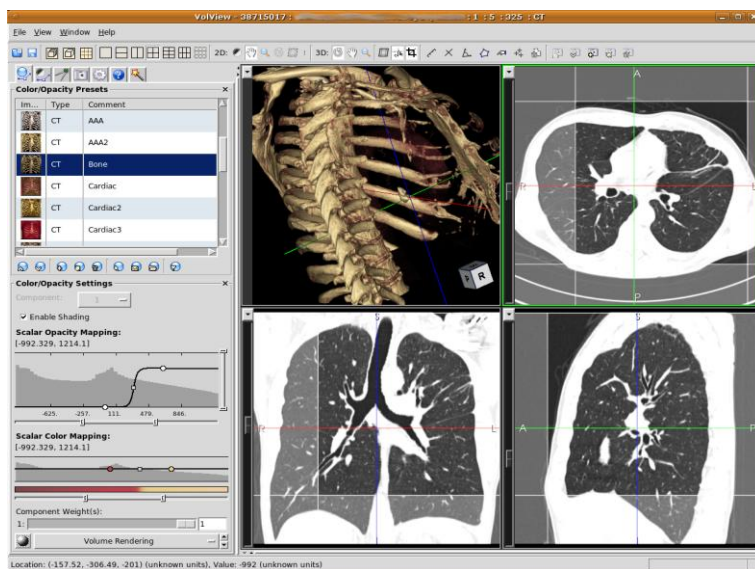
Ad 1. Wprowadzenie do obsługi programu VolView

Program VolView służy do wizualizacji objętościowej oraz analizy danych medycznych. Jest to program komercyjny, dostępny na kilku platformach programowych, stworzony przez firmę Kitware. Do wizualizacji wykorzystywana jest biblioteka VTK, zaś do przetwarzania danych biblioteka ITK (*Insight Segmentation and Registration Toolkit*).

Na rysunku 1 przedstawiono interfejs programu. Pod menu znajduje się belka z ikonami sterującymi wyglądem okien wizualizacji oraz definiującymi działania myszki w oknie 2D i 3D (skalowanie, przesuwanie itp.). Po lewej stronie znajdują się zakładki umożliwiające:

- *Color/Opacity Settings*: sterowanie kolorem i przezroczystością funkcji przejścia (*transfer function*), zakładka zawiera zestaw predefiniowanych ustawień,
- *Window/Level Presets*: sterowanie wizualizacją danych w trybie 2D poprzez zadawanie pozycji (*Level*) oraz szerokości okna (*Window*) prezentowanych danych, zawiera również zestaw ustawień,
- *Measurement/Annotation*: zarządzanie wykonanymi pomiarami oraz notatkami,

- *Snapshots*: zapisanie wyników wizualizacji w postaci plików graficznych oraz animacji,
- *Plugins*: dostęp do zestawu narzędzi do analizy danych,
- *Info*: przedstawienie najważniejszych danych medycznych na temat pacjenta, jednostki wykonującej badanie oraz szczegóły wykonanego badania,
- *Advanced Algorithms*: dostęp do algorytmów w postaci kreatorów, np. algorytm segmentacji płuc.



Rys. 1. Interfejs programu VolView.

W programie występują dwa rodzaje okien z wizualizacją: okna z dwuwymiarowymi przekrojami (tzw. płaszczyzny MPR) oraz okno z wizualizacją wolumetryczną.

Zadania:

1. Uruchom program VolView, wczytaj dane z pliku *volume1.vtk*.
2. Sprawdź możliwości wizualizacji danych, zastosuj zdefiniowane w programie ustawienia.
3. Użyj monochromatycznej oraz kolorowej mapy kolorów (opcja dostępna pod prawym klawiszem myszki).
4. Ogranicz zakres danych, przetestuj działanie kursora 3D (opcje włączane ikonami znajdującymi się na belce pod menu).
5. Przetestuj działanie narzędzi do pomiarów.

Ad 2. Dobór parametrów funkcji przejścia

W wizualizacji objętościowej (wolumetrycznej) kluczowe znaczenie ma zastosowana *funkcja przejścia*, definiująca, w jaki sposób danym (np. gęstość tkanek) są przypisywane konkretne kolory oraz przezroczystości. Program VolView udostępnia narzędzia graficzne umożliwiające prostą zmianę funkcji przejścia.

Zadania:

1. Wczytaj dane z tomografii komputerowej zapisane w postaci serii plików standardu DICOM (*dicom.zip*).
2. Dobierz funkcję przejścia modyfikując węzły w okienkach *Scalar Opacity Mapping* oraz *Scalar Color Mapping* (zakładka *Color/Opacity Presets*), w taki sposób, by widoczna była struktura tkanki płucnej i jednocześnie kości.

Ćwiczenie 5

Wprowadzenie do biblioteki Visualization Toolkit

Program ćwiczenia

1. Wprowadzenie do biblioteki Visualization Toolkit (VTK).
2. Praca z dokumentacją biblioteki, projektowanie potoku wizualizacji.
3. Rozbudowa przykładu o wczytywanie danych medycznych.
4. Mechanizm wymiany informacji między obiektami VTK.
5. Opracowanie indywidualnych programów.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawy programowania obiektowego w języku C++.

Literatura

- [1] Dokumentacja biblioteki VTK dostępna pod adresem:
www.vtk.org/VTK/help/documentation.html
- [2] W. Schroeder, K. Martin, B. Lorensen. *The Visualization Toolkit*. Kitware, 1996.
- [3] Dokumentacja programu vtkGUI: <http://vtkgui.cineca.it/home.htm>

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wprowadzenie do biblioteki Visualization Toolkit (VTK)

Biblioteka *Visualization ToolKit* jest dostępna na zasadach wolnego oprogramowania i umożliwia przetwarzanie oraz wizualizację danych z wykorzystaniem standardu OpenGL. Na bibliotekę składa się kilka tysięcy obiektów napisanych w języku C++. Biblioteka ta nie jest gotowym programem, a jedynie zbiorem narzędzi gotowych do użycia. VTK jest szeroko stosowane do budowy specjalistycznych aplikacji komercyjnych, takich jak VolView czy OsiriX, do tworzenia programów dostępnych na zasadach wolnego oprogramowania (ParaView, VisTrails), używana jest również w licznych projektach naukowych.

Podczas poprzednich ćwiczeń z programami ParaView oraz VolView można było się zapoznać z efektami działania biblioteki VTK, która w tych programach odpowiadała za wizualizację. Podczas kolejnych ćwiczeń poznamy zasady działania biblioteki umożliwiające tworzenie własnych aplikacji wykorzystujących bibliotekę VTK.

Przetwarzanie danych w bibliotece polega na łączeniu obiektów w potoki. W takim podejściu, wyjścia jednych obiektów są wejściami kolejnych. Możliwe jest również dzielenie (jedno wyjście do wielu wejść) oraz łączenie potoków przetwarzania danych (obiekt może wymagać danych z wielu różnych obiektów). Początkiem potoku przetwarzania danych są *źródła danych* (obiekty typu *Source*). Mogą to być obiekty wczytujące dane z plików, jak również obiekty generujące dane. Końcem strumienia są obiekty typu *Mapper*, stanowiące pomost między danymi, a ich reprezentacją graficzną, czyli obiektami typu *Actor*. Pomiedzy *źródłami* i *aktorami* znajdują się obiekty typu *Filters* (filtry), których głównym zadaniem jest przetwarzanie danych. Poza obiektami bezpośrednio tworzącymi główny strumień przetwarzania danych istnieją również inne, pomocnicze obiekty VTK. Można do nich zaliczyć np. obiekty niezbędne do wyświetlenia okna, w którym prezentowane są wyniki działania strumienia.

Podczas ćwiczeń zostanie przedstawiona metodologia pracy z biblioteką, która umożliwi zagłębienie się w bardziej zaawansowane metody przetwarzania oraz wizualizacji danych.

Zadania:

- Ściągnij ze strony kursu⁴ plik *projekt01.zip*. Zapoznaj się z zawartością archiwum.
- Otwórz wszystkie pliki w edytorze tekstu i przeanalizuj ich treść.
- Skompiluj program, a następnie go uruchom.

Ad 2. Praca z dokumentacją biblioteki, projektowanie potoku wizualizacji

Biblioteka VTK posiada bardzo rozbudowaną dokumentację wygenerowaną na podstawie kodu źródłowego przez program Doxygen i dostępną dla różnych wersji biblioteki pod adresem: <http://www.vtk.org/VTK/help/documentation.html>. Pełne wykorzystanie biblioteki jest możliwe jedynie przy sprawnym posługiwaniu się jej dokumentacją.

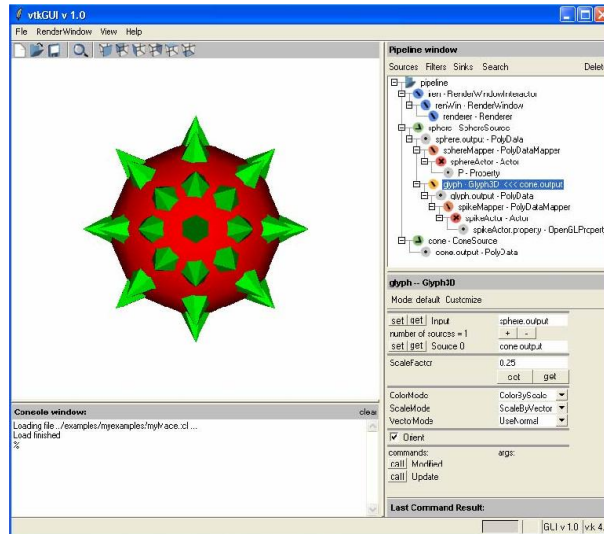
Zadania:

- Odszukaj opis obiektów VTK wykorzystanych w przykładowym kodzie.
- Zwróć uwagę na układ informacji na stronie dokumentacji. Jakie znaczenie praktyczne mają diagram dziedziczenia i współpracy? Gdzie prowadzą odnośniki *Tests*?
- Które obiekty stanowią źródła danych? Które są filtrami i gdzie kończy się strumień przetwarzania danych? Analizując metody *SetInput* i *GetOutput* określ wzajemne połączenia między obiektami.

Ponieważ VTK stało się w ostatnich latach bardzo popularne, powstało kilka narzędzi, które ułatwiają tworzenie potoku wizualizacji z obiektów VTK. Jednym z nich jest darmo-

⁴ Strona kursu: <http://moodle.cel.agh.edu.pl/weaie/course/view.php?id=406>

wy program vtkGUI [3]. Program powstał w języku TCL i wykorzystuje obiekty VTK w wersji 4.2. Interfejs programu przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 1. Interfejs programu vtkGUI

Po prawej stronie okna znajduje się hierarchia obiektów VTK, które tworzą strumień wizualizacji. Wynik obliczeń jest wyświetlany w czasie rzeczywistym w środkowej części okna programu. Poniżej wizualizacji znajduje się konsola TCL, którą można używać do debugowania programu. Poniżej drzewa z hierarchią obiektów znajdują się właściwości wybranego obiektu.

Program umożliwia szybkie łączenie obiektów VTK w celu przetestowania poprawności działania algorytmu. Jego bardzo cenną właściwością jest eksport strumienia wizualizacji do języka C++.

Praca z programem polega na dokładaniu kolejnych obiektów do już istniejących. Program dba, o to by łączone były wyłącznie obiekty kompatybilne ze sobą. Obiekty wybiera się z odpowiedniego menu (*Sources*, *Filters*, *Sinks*) położonego w oknie *Pipeline window*. Znajduje się tam również wyszukiwarka obiektów (*Search Window*).

Program oznacza obiekty sześcioma rodzajami ikonek:

1. kolorem zielonym oznaczane są źródła danych, obiekty wczytujące i importujące dane,
2. kolorem czerwonym z krzyżykiem obiekty kończące strumień, takie jak aktorzy, obiekty zapisujące i eksportujące dane,
3. kolorem żółtym zaznaczane są filtry,
4. kolorem jasno czerwonym obiekty typu mapper,
5. kolorem niebieskim obiekty bezpośrednio wykorzystywane w renderowaniu obrazu (*Renderer*, *RenderWindow*, *RenderWindowInteractor*),
6. kolor szary oznacza pozostałe obiekty, np. konwertery formatów.

Zadanie:

- Uruchom program `vtkGUI`.
- Wczytaj i uruchom poszczególne pliki z przykładowymi programami (File/Open). Wyeksportuj przykładowe programy do języka C++.
- Na podstawie kodu C++ zawartego w *projekt01.zip* odtwórz efekty działania programu, wykorzystując obiekty `vtkGUI`.

Ad 3. Rozbudowa przykładu o wczytywanie danych medycznych

Celem tego ćwiczenia jest rozbudowa początkowego projektu o obiekt odczytujący plik z danymi medycznymi. Dane te zostaną następnie przedstawione w formie graficznej.

Zadania:

- Dodaj do strumienia możliwość odczytu danych medycznych (format DICOM lub RAW).
- Przedstaw dane w postaci przekrojów 2D.
- Zmień sposób kodowania danych na kolory, zmień monochromatyczną tablicę kolorów na tablicę kolorową LUT.
- Wygeneruj izopowierzchnię przedstawiającą granicę powietrze-tkanki przy pomocy algorytmu *vtkMarchingCubes*. Odszukaj w dokumentacji inne metody generowania izopowierzchni.

Ad 4. Mechanizm wymiany informacji między obiektami VTK

Biblioteka VTK wykorzystuje do komunikacji między obiektami mechanizm zdarzeń (*vtkEvent*). Każdy obiekt będący potomkiem klasy *vtkObject* posiada metodę *AddObserver()*, która może być wykorzystana np. do powiadomienia użytkownika o postępach w długotrwałych obliczeniach lub do wywołania odpowiedniej reakcji na interakcję myszką.

Zadania:

- Znajdź w dokumentacji biblioteki VTK przykłady użycia obiektów typu *vtkWidget*.
- Rozbuduj własny program do wizualizacji danych medycznych o sterowaną myszką płaszczyznę MPR (obiekt *vtkPlaneWidget*).
- Uzupełnij program o zwracanie informacji o postępach we wczytywaniu danych (obsługa zdarzenia *vtkCommand::ProgressEvent*).

Ad 5. Opracowanie indywidualnych programów

Zadanie:

- Opracuj własny strumień wizualizacji, wykorzystując bibliotekę VTK oraz jedną z poznanych technik prezentacji danych.

**ANALIZA SYGNAŁÓW
BIOMEDYCZNYCH**

opracował

dr inż. Krzysztof Duda

Ćwiczenie 1

Sygnały dyskretne. Splot dyskretny i widmo sygnału dyskretnego

Program ćwiczenia

1. Generowanie sygnału sinusoidalnego z pulsacją w radianach i z częstotliwością w hercach.
2. Generowanie zespolonego ciągu eksponencjalnego.
3. Generowanie ciągów pseudolosowych; addytywne zakłócenie szumem sygnałów deterministycznych.
4. Wczytanie do środowiska Matlab pomiarowego sygnału biomedycznego.
5. Obliczanie histogramu.
6. Modulacja amplitudowa sygnału sinusoidalnego.
7. Modulacja częstotliwościowa sygnału sinusoidalnego.
8. Obliczanie splotu liniowego sygnałów dyskretnych.
9. Obliczanie widma Fouriera sygnałów dyskretnych.
10. Implementacja dyskretnej filtracji rekursywnej.

Zakres wymaganych wiadomości

Definicje: histogram, dyskretny splot liniowy, widmo Fouriera sygnałów dyskretnych.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T.P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd Edition, Prentice-Hall, Signal Processing Series, 1999.
- [4] *Matlab Signal Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Generowanie sygnału sinusoidalnego z pulsacją w radianach i z częstotliwością w hercach

Generowanie sygnałów cyfrowych opisanych analitycznie za pomocą funkcji np. $x[n] = A \sin(\omega n + \varphi)$ polega na wyliczeniu wartości tych funkcji dla zadanych argumentów.

Wygenerować sygnał $x[n] = A\sin(\omega n + \varphi)$ o długości $N = 32$ próbek. Narysować ten sygnał, opisać osie OX i OY na wykresie. Zaobserwować przebiegi sygnału dla zmian ω z zakresu od 0 do 2π .

Rozwiązanie

Program 1 generuje ciąg sinusoidalny. Pierwsze trzy linie kodu służą inicjalizacji środowiska. W liniach 5-8 zebrane są występujące w programie parametry. Następnie w programie występuje blok obliczeń i blok prezentacji wyników. W miarę możliwości należy zawsze stosować powyższą strukturę programu tj.: parametry, obliczenia i wizualizacja.

Program 1

```
1 close all      %zamknięcie okien graficznych
2 clear all     %usunięcie zmiennych z pamięci
3 clc          %wyczyszczenie okna konsoli
4 %% parametry
5 Nx=32;       %długość sygnału x (liczba próbek)
6 w=pi/4;     %częstotliwość sygnału [rad]
7 A=2;        %amplituda sygnału
8 fi=pi/11;   %faza sygnału
9 %% obliczenia
10 n=0:Nx-1;   %wektor argumentów funkcji sin
11 x=A*sin(w*n+fi); %wektor sygnału
12 %% wizualizacja
13 figure
14     plot(n,x,'.-')
15     xlabel('n')
16     ylabel('x[n]')
17     title(['\omega=' num2str(w,'%2.2f') ' [rad]'])
18     axis tight
```

Przebiegi sygnału $x[n]$ dla zmian ω z zakresu od 0 do 2π można zaobserwować uruchamiając program 1 z różnymi wartościami ω . Można też zastosować prostą animację polegającą na tym, że w pętli, na wykresie rysowane są kolejne przebiegi, tak jak zaimplementowano to w programie 2.

Program 2

```
1 close all, clear all, clc
2 %% parametry
3 Nx=32;
4 w=0:pi/600:2*pi; %wektor pulsacji
5 A=2;
6 fi=0;
7 %% obliczenia
8 n=0:Nx-1;
9 for k=1:length(w)
10     %obliczenia
11     x=A*sin(w(k)*n+fi); %wektor sygnału
```

```
12     %wizualizacja
13     plot(n,x,'.-')
14     xlabel('n')
15     ylabel('x[n]')
16     title(['\omega=' num2str(w(k),'%2.2f') ' [rad]'])
17     axis([0 Nx-1 -A A])
18     drawnow
19 end
```

Wygenerować sygnał $x[n] = A\sin(2\pi ft + \varphi)$ o długości $N = 32$ próbek. Częstotliwość sygnału wynosi $f = 10$ Hz, częstotliwość próbkowania wynosi $F_s = 100$ Hz. Narysować ten sygnał, opisać oś OX w sekundach. Zaobserwować przebiegi sygnału dla zmian f z zakresu od 0 do $2F_s$.

Jaka jest maksymalna częstotliwość sygnału f dla ustalonej częstotliwości próbkowania F_s ?

Ad 2. Generowanie zespolonego ciągu eksponencjalnego

Wygenerować zespolony ciąg eksponencjalny $x[n] = Ae^{j\omega n}$. Narysować na jednym wykresie część rzeczywistą, część urojoną i moduł tego ciągu. Opisać wykresy za pomocą funkcji legend.

Jednostka urojona jest oznaczana w Matlabie jako j , a funkcja eksponencjalna `exp`.

Ad 3. Generowanie ciągów pseudolosowych; addytywne zakłócenie szumem sygnałów deterministycznych

Do sygnału z punktu 1 dodać liczby pseudolosowe. Do generowania liczb pseudolosowych należy wykorzystać funkcje Matlabu `rand` lub `randn`.

Ad 4. Wczytanie do środowiska Matlab pomiarowego sygnału biomedycznego

Napisać program do wczytywania danych w postaci binarnej do środowiska Matlab. Wykorzystać funkcje `fopen`, `fread` i `fclose`. Wczytać przykładowy sygnał biomedyczny w postaci binarnej, np. sygnał EKG. Narysować ten sygnał, wyskalować oś OX w sekundach.

Ad 5. Obliczanie histogramu

Napisać funkcję liczącą histogram. Przyjąć nazwę funkcji `hist_lab`. Argumentami funkcji są: sygnał x , dla którego liczymy histogram oraz liczba przedziałów Np , w których zliczamy wartości. Funkcja zwraca liczbę wartości L i środki przedziałów w .

Przetestować działanie napisanej funkcji `hist_lab` dla sygnałów pseudolosowych o rozkładzie normalnym i równomiernym. Porównać wyniki z funkcją Matlabu `hist`.

Rozwiązanie

Program 3

```
1 function [L,w]=hist_lab(x,Np);
2 %Funkcja do liczenia histogramu
3 %x - sygnał
4 %Np - liczba przedziałów
5 %L - liczba wartości w przedziale
6 %w - wartości
7
8 %% Przeskalowanie wartości x do przedziału (0,1) i (0,Np-1)
9 x_min=min(x(:)); x=x(:)-x_min;
10 x_max=max(x); x=x/max(x);
11 x=round((Np-1)*x);
12 %% Liczenie histogramu
13 L=zeros(1,Np);
14 for k=1:length(x)
15     L(x(k)+1)=L(x(k)+1)+1;
16 end
17 w=(0:Np-1)/Np;
18 w=w*x_max;
19 w=w+x_min;
```

Ad 6. Modulacja amplitudowa sygnału sinusoidalnego

Wygenerować sygnał sinusoidalny zmodulowany amplitudowo sygnałem sinusoidalnym: $x[n] = (1 + k m[n]) \cos(\omega_0 n)$, $0 < k \leq 1$, gdzie k - jest głębokością modulacji, a $m[n]$ przebiegiem sinusoidalnym $m[n] = \cos(\omega_m n)$, $\omega_m \ll \omega_0$.

Zaobserwować przebiegi sygnału dla różnych wartości parametrów.

Ad 7. Modulacja częstotliwościowa sygnału sinusoidalnego

Wygenerować sygnał sinusoidalny zmodulowany w częstotliwości sygnałem sinusoidalnym: $x[n] = \cos(\omega_0 n + k \cos(\omega_m n) / \omega_m)$, $\omega_m \ll \omega_0$. Częstotliwość chwilowa (pochodna argumentu funkcji kosinus) wynosi $m[n] = \omega_0 - k \sin(\omega_m n)$, czyli oscyluje wokół ω_0 . W celu zachowania dodatniej częstotliwości sygnału nośnego musi być spełnione $\omega_0 \geq k \sin(\omega_m n)$.

Zaobserwować przebiegi sygnału dla różnych wartości parametrów.

Ad 8. Obliczanie splotu liniowego sygnałów dyskretnych

Napisać funkcję do obliczania splotu liniowego dwóch wektorów o skończonych długościach wg wzoru:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] = x[n] * h[n]. \quad (1)$$

Przyjąć nazwę funkcji `splot`. Porównać wyniki działania napisanej funkcji z funkcją Matlab'a `conv`.

Rozwiązanie

Program 4 przedstawia implementację splotu liniowego bezpośrednio na podstawie wzoru definicyjnego (1). Dla wektorów o długościach N_x i N_h wynik splotu ma długość N_x+N_h-1 . Pętla zewnętrzna po n wyznacza kolejne elementy wektora $y[n]$. W pętli wewnętrznej po k są sumowane iloczyny dla ustalonego n . Warunek `if` ogranicza indeksy do zakresu wektorów, pozostałe iloczyny są równe zero.

Program 4

```
1 function y=splot(x,h);
2
3 Nx=length(x);
4 Nh=length(h);
5 Ny=Nx+Nh-1;
6 y=zeros(1,Ny);
7 for n=1:Ny
8     for k=1:Nx;
9         if n-k>=0 && n-k<Nh
10            y(n)=y(n)+x(k)*h(n-k+1);
11        end
12    end
13 end
```

Program 5 wykorzystuje fakt, że w trakcie liczenia splotu odwrócona w czasie odpowiedź impulsowa filtra jest przesuwana wzdłuż sygnału. Przed obliczeniami sygnały x i h są uzupełniane zerami. Wewnętrzna pętla po k jest zrealizowana w linii 13 w postaci iloczynu skalarnego, następnie w linii 14 współczynniki filtra są przesuwane o jedną pozycję.

Program 5

```
1 function y=splot(x,h);
2 %x,h - wektory wierszowe
3
4 Nx=length(x);
5 Nh=length(h);
6 Ny=Nx+Nh-1;
7 h = fliplr(h(:).'); %odwrócenie w czasie współczynników filtra
```

```
8 xz=zeros(1,Ny); xz(Nh:end)=x;
9 hz=zeros(1,Ny); hz(1:Nh)=h;
10 y=zeros(1,Ny);
11 hz=hz(:); %zamiana na wektor kolumnowy
12 for n=1:Ny;
13     y(n)=xz*hz; %iloczyn wektorowy
14     hz = [0; hz(1:Ny-1)];
15 end
```

Ad 9. Obliczanie widma Fouriera sygnałów dyskretnych

Napisać funkcję do obliczania widma sygnału dyskretnego wg wzoru:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\omega n}. \quad (2)$$

Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function [Xw, w]=fourier_ciagly(x,dw,wz);
2
3 %ciągła transformacja Fouriera sygnałów dyskretnych
4 %dw - krok częstotliwości [rad]
5 %wz=[w1 w2]- zakres częstotliwości [rad]
6 %x - sygnał
7 %Xw - widmo sygnału x
8 %w - pulsacje, dla których wyznaczono widmo Xw
9 %
10 %przykładowe wywołanie
11 %[Xw, w]=fourier_ciagly(x,0.01,[-pi pi]);
```

Wygenerować sinusoidalny sygnał testowy (patrz punkt 1) i obliczyć widmo tego sygnału za pomocą funkcji `fourier_ciagly` w przedziale częstotliwości ω od $-\pi$ do π radiana.

Narysować przebieg czasowy sygnału testowego i jego charakterystykę amplitudową. Obliczyć widmo i narysować charakterystyki amplitudowe dla: sygnału stałego, sygnału zespolonego eksponencjalnego, sygnału pseudolosowego (funkcje `rand`, `randn`) i fali prostokątnej (funkcja `square`).

Ad 10. Implementacja dyskretnej filtracji rekursywnej

Napisać funkcję realizującą filtrację cyfrową wg wzoru:

$$y[n] = \sum_{m=0}^M \frac{b[m]}{a[0]} x[n-m] - \sum_{k=1}^N \frac{a[k]}{a[0]} y[n-k]. \quad (3)$$

Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function y=filter_lab(b,a,x);  
2 %b - współczynniki licznika transmitancji  
3 %a - współczynniki mianownika transmitancji
```

Porównać wyniki działania funkcji `filter_lab` z funkcją Matlaba `filter`.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 2

Projektowanie filtrów analogowych. Projektowanie rekursywnych filtrów cyfrowych IIR

Program ćwiczenia

1. Analogowe filtry dolnoprzepustowe LP.
2. Analogowe filtry górnoprzepustowe HP, pasmowoprzepustowe BP i pasmowozaporowe BS.
3. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów analogowych.
4. Filtry cyfrowe Butterwortha, Czebyszewa typu I, Czebyszewa typu II i eliptyczny.
5. Implementacja transformacji biliniowej.
6. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów cyfrowych.
7. Odpowiedź impulsowa i skokowa filtrów cyfrowych.

Zakres wymaganych wiadomości

Projektowanie analogowego filtra Butterwortha, transformacja częstotliwości transmitancji prototypu filtra analogowego, transformacja biliniowa, charakterystyki częstotliwościowe filtrów analogowych i cyfrowych.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T.P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Signal Processing Series, 1999.
- [4] *Matlab Signal Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Analogowe filtry dolnoprzepustowe LP

Analogowy filtr dolnoprzepustowy powinien spełniać następujące wymagania: krawędź pasma przenoszenia $f_{pass}=1$ kHz, dopuszczalna nieliniowość wzmocnienia w paśmie przepustowym $r_p=1$ dB, krawędź pasma zaporowego $f_{stop}=1.5$ kHz, minimalne tłumienie w paśmie zaporowym $r_s=30$ dB. Wyznaczyć transmitancję $H(s)$ filtrów: Butterwortha,

Czebyszewa typu I, Czebyszewa typu II i eliptycznego, spełniających powyższe wymagania. Podać rzędy tych filtrów. Narysować zera i bieguny transmitancji tych filtrów. Na jednym wykresie narysować (porównać) charakterystyki amplitudowe tych filtrów. Na jednym wykresie narysować (porównać) charakterystyki fazowe tych filtrów.

Dla filtra Butterwortha obliczyć rząd filtra:

$$N = \frac{1}{2} \log_{10} \left(\frac{10^{r_p/10} - 1}{10^{r_s/10} - 1} \right) / \log_{10} \left(\frac{\Omega_{pass}}{\Omega_{stop}} \right), \quad (1)$$

pulsację 3 dB:

$$\Omega_c = \frac{\Omega_{pass}}{(10^{r_p/10} - 1)^{\frac{1}{2N}}} \quad (2)$$

i bieguny transmitancji:

$$s_k = j^{2N} \sqrt{-1} \Omega_c = \Omega_c e^{j(\pi/2N)(2k+N-1)}, \quad k = 0, 1, \dots, 2N-1. \quad (3)$$

Przejsć z postaci iloczynowej transmitancji do postaci wielomianowej funkcją `zp2tf`, charakterystyki częstotliwościowej obliczyć funkcją `freqs`.

Dla filtrów Czebyszewa typu I, Czebyszewa typu II i eliptycznego zastosować funkcje Matlab'a `cheby1`, `cheby2` i `ellip` do wyznaczenia ich transmitancji (funkcje te należy wywołać z parametrem `s`).

Ad 2. Analogowe filtry górnoprzepustowe HP, pasmowoprzepustowe BP i pasmowozaporowe BS

Napisać program do transformacji częstotliwości unormowanego prototypu filtra analogowego z charakterystyki dolnoprzepustowej na pasmowoprzepustową, a następnie przetransformować analogowy, dolnoprzepustowy prototyp filtra Butterwortha 3-go rzędu na filtr pasmowoprzepustowy o częstotliwościach 3 dB równych 5 Hz i 7 Hz. Narysować charakterystyki amplitudowe obu filtrów.

Napisać program do transformacji częstotliwości unormowanego prototypu filtra analogowego z charakterystyki dolnoprzepustowej na górnoprzepustową i pasmowozaporową.

Ad 3. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów analogowych

Napisać funkcję do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych transmitancji analogowej $H(s)$. W obliczeniach zastosować podstawienie:

$$s = j\Omega. \quad (4)$$

Wartości licznika $B(j\Omega)$ i mianownika $A(j\Omega)$ obliczyć funkcją Matlab'a `polyval`. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function H=freqs_lab(B,A,w);
2 %Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji H(s)=B(s)/A(s)
3 %w - pulsacje [rad/s], dla których wyliczona jest charakterystyka
```

Ad 4. Filtry cyfrowe

Cyfrowy filtr dolnoprzepustowy powinien spełniać następujące wymagania: krawędź pasma przenoszenia $f_{pass} = 0.8$ kHz, dopuszczalna nieliniowość wzmocnienia w paśmie przepustowym $r_p=1$ dB, krawędź pasma zaporowego $f_{stop} = 1.2$ kHz, minimalne tłumienie w paśmie zaporowym $r_s=30$ dB. Częstotliwość próbkowania $F_s=4$ kHz. Wyznaczyć transmitancję $H(z)$ filtrów: Butterwortha, Czebyszewa typu I, Czebyszewa typu II i eliptycznego, spełniających powyższe wymagania.

Podać rzędy tych filtrów. Narysować zera i bieguny transmitancji tych filtrów. Na jednym wykresie narysować (porównać) charakterystyki amplitudowe tych filtrów. Na jednym wykresie narysować (porównać) charakterystyki fazowe tych filtrów.

Transmitancję filtrów wyznaczyć funkcjami Matlab: `butter`, `cheby1`, `cheby2` i `ellip`.

Ad 5. Implementacja transformacji biliniowej

Napisać program implementujący transformację biliniową, a następnie zastosować ten program do dyskretyzacji analogowej transmitancji $H(s)$ dolnoprzepustowego prototypu filtra Butterwortha 3-go rzędu. Porównać wyniki z funkcją `bilinear`.

Ad 6. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów cyfrowych

Napisać funkcję do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych transmitancji dyskretnej $H(z)$. W obliczeniach zastosować podstawienie:

$$z = e^{j\omega}. \quad (5)$$

Wartości licznika $B(e^{j\omega})$ i mianownika $A(e^{j\omega})$ obliczyć funkcją Matlab `polyval`. Przyjąć następującą składnię funkcji:

```
1 function H=freqz_lab(B,A,w);
2 %Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji H(z)=B(z)/A(z)
3 %w - pulsacje [rad], dla których wyliczona jest charakterystyka
```

Ad 7. Odpowiedź impulsowa i skokowa filtrów cyfrowych

Obliczyć odpowiedzi impulsowe i skokowe filtrów z punktu 4. Narysować je funkcją Matlab `stem`. Do obliczenia odpowiedzi impulsowej i skokowej wykorzystać impuls jednostkowy i skok jednostkowy oraz funkcję Matlab `filter`.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 3

Projektowanie nierekursywnych filtrów cyfrowych FIR. Filtracja sygnałów cyfrowych

Program ćwiczenia

1. Projektowanie filtrów FIR metodą okien.
2. Filtracja sygnałów cyfrowych filtrami FIR i IIR.
3. Obliczanie spłotu liniowego przez DFT.
4. Splot sekcjonowany - metoda *overlap-add* i metoda *overlap-save*.

Zakres wymaganych wiadomości

Projektowanie nierekursywnych filtrów cyfrowych FIR metodą okien, okno Kaisera, metoda Parks-McClellana; obliczanie spłotu przez FFT; splot sekcjonowany.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. UWND AGH, Kraków, 2010.
- [2] T.P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Signal Processing Series, 1999.
- [4] *Matlab Signal Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Projektowanie filtrów FIR metodą okien

Zaprojektować metodą okien filtr dolnoprzepustowy typu FIR, który dla częstotliwości próbkowania $F_s=4$ kHz ma krawędź pasma przenoszenia $f_{pass}=1$ kHz.

Zaobserwować zmiany charakterystyki amplitudowej filtra dla różnych długości wybranego okna.

Zaobserwować zmiany charakterystyk amplitudowych filtra dla różnych rodzajów okien o stałej długości (np. dla okna prostokątnego i Hamminga). Narysować na jednym wykresie charakterystyki amplitudowe filtra o ustalonej długości dla wybranych okien.

Odpowiedź impulsowa idealnego filtra dolnoprzepustowego typu FIR dana jest wzorem:

$$h_{LP}[n] = \frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n} = \begin{cases} \sin(\omega_c n)/(\pi n), & n \neq 0 \\ \omega_c / \pi, & n = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

gdzie ω_c - krawędź pasma przenoszenia w radianach.

Rozwiązanie

Program 1 wykorzystuje prostą animację umożliwiającą obserwację wpływu długości odpowiedzi impulsowej filtra na szerokość listka głównego i położenie listków bocznych dla okna prostokątnego i okna Hamminga.

Odpowiedź impulsowa filtra jest liczona w linii 8 dla $n > 0$ i $n = 0$, fragment $h[n]$ dla $n < 0$ jest symetryczny (parzysty względem osi OY) do $h[n]$ dla $n > 0$.

Usunięcie znaku `%` w linii 9 powoduje zastosowanie okna Hamminga zamiast okna prostokątnego.

Usunięcie znaku `%` w liniach 22 i 28 powoduje zmianę wyskalowania osi na charakterystykach amplitudowych.

Program 1

```
1 close all, clear all, clc
2 M=1:100;
3 Fs=4e3;           %Hz
4 fpass=1e3;       %Hz
5 wc=pi*fpass/(Fs/2); % [rad]
6 f=-Fs/2:1:Fs/2;
7 for k=1:length(M)
8   n=1:M(k); h= sin(wc*n)./(pi*n); h=[fliplr(h) wc/pi h];
9   %h = h(:).*hamming(length(h));
10   Hw = freqz(h,1,f,Fs);
11   figure(1)
12       subplot(3,1,1)
13           stem(h)
14           xlabel('n')
15           ylabel('h[n]')
16           axis tight, box on
17       subplot(3,1,2)
18           plot(f,abs(Hw))
19           xlabel('f [Hz]')
20           ylabel('|H(e^j\omega)|')
21           axis([min(f) max(f) 0 1.2]), box on
22           %axis([0 1.2*fpass 0 1.2]), box on
23       subplot(3,1,3)
24           plot(f,20*log10(abs(Hw)))
```

```

25         xlabel('f [Hz]')
26         ylabel('|H(e^j\omega)| [dB]')
27         axis([min(f) max(f) -70 5]), box on
28         %axis([0 1.2*fpass -70 5]), box on
29         drawnow
30     end

```

Zaprojektować metodą okien filtr pasmowozaporowy typu FIR, który dla częstotliwości próbkowania $F_s=4$ kHz ma krawędzie pasma przenoszenia $f_{pass1} = 0.8$ kHz i $f_{pass2} = 1.2$ kHz.

Zaprojektować metodą okien filtr dolnoprzepustowy typu FIR, który ma krawędź pasma przenoszenia $\omega_p = \pi/4$ rad. Wykorzystując twierdzenie o modulacji przesunąć charakterystykę częstotliwościową tego filtra o $\pi/2$ i π .

Cyfrowy filtr dolnoprzepustowy typu FIR powinien spełniać następujące wymagania: krawędź pasma przenoszenia $f_{pass} = 0.8$ kHz, dopuszczalna nieliniowość wzmocnienia w paśmie przepustowym $r_p = 1$ dB, krawędź pasma zaporowego $f_{stop} = 1.2$ kHz, minimalne tłumienie w paśmie zaporowym $r_s = 60$ dB. Częstotliwość próbkowania $F_s = 4$ kHz. Zaprojektować ten filtr: 1) metodą okien, poprzez dobór odpowiedniego okna Kaisera, funkcje Matlaba `kaiserord` i `fir1`; 2) metodą Parksa-McClellana, funkcja Matlaba `firpm`.

Porównać na wykresach odpowiedzi impulsowe i charakterystyki amplitudowe tych filtrów.

Ad 2. Filtracja sygnałów cyfrowych filtrami FIR i IIR

Wygenerować sygnał testowy $x[n]$ o długości $N_x = 256$ próbek złożony z sumy dwóch przebiegów sinusoidalnych o częstotliwościach $f_1 = 50$ Hz i $f_2 = 150$ Hz. Częstotliwość próbkowania wynosi $F_s = 1000$ Hz.

Zaprojektować cyfrowy filtr dolnoprzepustowy typu FIR (np. funkcja `fir1`, $N = 21$) i typu IIR (np. funkcja `cheby1`, $N = 5$) o krawędzi pasma przepuszczania 100 Hz. Narysować charakterystyki amplitudowe tych filtrów.

Przefiltrować sygnał testowy filtrem FIR i filtrem IIR za pomocą funkcji Matlaba `filter`.

Zaobserwować przebiegi czasowe i widma sygnałów przed i po filtracji.

Pomiarowy sygnał biomedyczny zakłócić addytywnie szumem o rozkładzie normalnym. Zaprojektować filtr FIR i filtr IIR służący do odszumienia (wygładzenia) sygnału pomiarowego. Jakość odszumiania ocenić przez narysowanie na jednym wykresie sygnału zaszumionego i po filtracji (tj. odszumionego) oraz przez porównanie sygnału oryginalnego (tj. przed zaszumieniem) i sygnału po odszumianiu.

Pomiarowy sygnał biomedyczny zakłócić addytywnym sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz. Zaprojektować filtr FIR i filtr IIR służący do usunięcia tego zakłócenia. Jakość algorytmu ocenić przez narysowanie na jednym wykresie sygnału zakłóconego

go i po filtracji (tj. z usuniętym zakłóceniem) oraz przez porównanie sygnału oryginalnego (tj. przed zakłóceniem) i sygnału po usunięciu zakłócenia.

Ad 3. Obliczanie spłotu liniowego przez DFT

Obliczyć spłot sygnału testowego z punktu 2 z filtrem FIR przez DFT

Ad 4. Spłot sekcjonowany - metoda *overlap-add* i metoda *overlap-save*

Obliczyć spłot sygnału testowego z punktu 2 z filtrem FIR stosując podział na sekcje metodą *overlap-add*. Spłoty poszczególnych sekcji obliczyć poprzez FFT.

Rozwiązanie

Program 2 implementuje metodę sekcjonowanych spłotów liniowych *overlap-add*. Implementacja algorytmu zaczyna się w linii 15, gdzie wybierana jest długość sekcji, która powinna być nie mniejsza niż długość filtra. Następnie odpowiedź impulsowa filtra jest uzupełniana zerami w linii 20 i wyznaczane jest widmo filtra. W pętli wybierane są kolejne, niezachodzące na siebie fragmenty sygnału wejściowego i liczone są spłoty liniowe przez FFT. Zachodzące na siebie fragmenty spłotów liniowych są dodawane w linii 31.

Poprawność implementacji sprawdzana jest w linii 34 przez porównanie wyniku z funkcją Matlaba `conv`.

Program 2

```
1 close all, clear all, clc
2 % Spłot sekcjonowany metoda overlap-add
3 Nx=256;
4 f1=50; A1=1; fi1=pi/7;
5 f2=150; A2=2; fi2=0;
6 Fs=1000;
7 t=(0:Nx-1)/Fs;
8 x1=A1*sin(2*pi*f1*t+fi1);
9 x2=A2*sin(2*pi*f2*t+fi2);
10 x=x1+x2; %sygnał testowy
11 h=fir1(21,100/(Fs/2)); %filtr LP
12 Nh=length(h);
13 y1=conv(h,x); %poprawny wynik
14 %% obliczenia
15 L=32; %długość sekcji >= Nh
16 L=max([L,Nh]);
17 nL=ceil(Nx/L); %liczba sekcji
18 x=[x zeros(1,nL*L-length(x))];
19 Ny=Nh+L-1;
20 hz=zeros(1,Ny);
21 hz(1:Nh)=h;
22 Hw=fft(hz); %widmo h[n] jest liczone tylko raz!!!
23 y=zeros(1,Nh+length(x)-1);
24 for k=1:nL
```

```

25     xz=zeros(1,Ny);
26     ind=1+(k-1)*L;
27     xz(1:L)=x(ind:ind+L-1);
28     Xw=fft(xz);
29     ys=ifft(Xw.*Hw); %wynik splotu liniowego dla sekcji
30     ind=1+(k-1)*L;
31     y(ind:ind+Ny-1)=y(ind:ind+Ny-1)+ys;
32 end
33 y=y(1:Nx+Nh-1);
34 blad=sum(abs(y1-y))%sprawdzenie przez porównanie z funkcją conv
35 figure
36     subplot(3,1,1), hold on
37         plot(x1,'r')
38         plot(x2,'k')
39         legend('x_1','x_2')
40         axis tight
41     subplot(3,1,2)
42         plot(x,'b')
43         legend('x_1+x_2')
44         axis tight
45     subplot(3,1,3), hold on
46         plot(x1,'r')
47         plot(y,'b')
48         legend('x_1','y')
49         axis tight

```

Obliczyć spłot sygnału testowego z punktu 2 z filtrem FIR stosując podział na sekcje metodą *overlap-save*. Spłoty poszczególnych sekcji obliczyć poprzez FFT.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 4

Metody obliczania DFT. Analiza częstotliwościowa z wykorzystaniem DFT

Program ćwiczenia

1. Definicyjne i macierzowe obliczanie DFT.
2. FFT z podziałem w czasie i z podziałem w częstotliwości.
3. Widma sygnałów o wartościach rzeczywistych.
4. Algorytm Goertzla obliczania DFT.
5. Transformacja Chirp-Z.
6. Analiza częstotliwościowa z wykorzystaniem DFT; przedłużenie sygnału przez dołączenie zer; wpływ okna czasowego; wpływ długości sygnału; rozdzielczość częstotliwościowa i rozdzielczość amplitudowa.
7. Okna Rifea-Vincenta klasy I i interpolowane DFT.
8. Spektrogram.
9. Periodogram i uśredniony periodogram.

Zakres wymaganych wiadomości

Definicja dyskretnego przekształcenia Fouriera DFT; algorytmy szybkiej transformacji Fouriera FFT z podziałem w czasie i podziałem w częstotliwości; obliczanie widm sygnałów o wartościach rzeczywistych; algorytm Goertzla obliczania DFT z naturalną i odwrotną kolejnością próbek na wejściu; transformacja Chirp-Z; rozdzielczość częstotliwościowa i amplitudowa DFT; przeciek widmowy; okna Rifea-Vincenta klasy I i interpolowane DFT; spektrogram; periodogram; uśredniony periodogram.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T.P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Signal Processing Series, 1999.
- [4] *Matlab Signal Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Definicyjne i macierzowe obliczanie DFT

Napisać program liczenia prostej i odwrotnej DFT wg wzorów (1) i (2):

DFT - analiza:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j(2\pi/N)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

IDFT - synteza:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j(2\pi/N)kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 0 \leq k \leq N-1. \quad (2)$$

Obliczyć DFT sygnału sinusoidalnego i pseudolosowego, wynik porównać z funkcją Matlabu `fft`. Narysować błąd rekonstrukcji

$$\varepsilon = x[n] - \text{IDFT}\{\text{DFT}\{x[n]\}\}. \quad (3)$$

Wygenerować macierz przekształcenia DFT:

$$\mathbf{W} = W[k, n] = W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}. \quad (4)$$

Obliczyć DFT sygnału sinusoidalnego \mathbf{x} w formie macierzowej:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{x}. \quad (5)$$

Zaobserwować, że macierz odwrotna funkcji bazowych jest równa przeskalowanej macierzy sprzężonej:

$$\mathbf{W}^{-1} = \frac{1}{N} \mathbf{W}^*. \quad (6)$$

Dokonać syntezy sygnału w postaci macierzowej:

$$\mathbf{x} = \frac{1}{N} \mathbf{W}^* \mathbf{X}. \quad (7)$$

Ad 2. FFT z podziałem w czasie i z podziałem w częstotliwości

Zaimplementować algorytm FFT z podziałem w czasie. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function Xw=fft_lab(xt);
2 %FFT z podziałem czasowym
```

Porównać wyniki obliczeń funkcji `fft_lab` i funkcji Matlaba `fft`.

Rozwiązanie

Program 1

```
1 function Xw=fft_lab(xt);
2 %FFT z podziałem czasowym
3
4 N=length(xt);
5 %% uzupełnienie zerami do długości 2^v
6 v=ceil(log2(N)); %liczba bitów
7 xt=[xt zeros(1,2^v-N)];
8 N=length(xt);
9 %% odwrócenie kolejności bitów, indeksowanie od 0
10 xo= zeros(size(xt)); %inicjalizacja zmiennej
11 b = 2.^(v-1:-1:0); %wagi binarne
12 for k=0:N-1;
13     ind=k;
14     ko=zeros(1,v);
15     for k1=0:v-1
16         if ind-b(k1+1)>=0
17             ko(k1+1)=1; ind=ind-b(k1+1);
18         end
19     end
20     ind_o=sum(fliplr(ko).*b);
21     xo(ind_o+1)=xt(k+1);
22 end
23 %% algorytm FFT
24 X=zeros(2,N); %pamięć dla danych i wyników
25 X(1,:)=xo; %dane
26 WN=exp(-j*2*pi/N);
27 for k=0:v-1 %pętla po etapach
28     M=2^k; %liczba motylek w bloku
29     for k1=0:N/2/M-1; %pętla po blokach
30         for k2=0:M-1; %pętla wewnątrz bloku
31             %ustalenie indeksów
32             p=k1*N/2^(v-k-1)+k2;
33             q=p+M;
34             r=2^(v-k-1)*k2;
35             %obliczenia motylkowe
36             X(2,p+1)=X(1,p+1)+WN^r*X(1,q+1);
37             X(2,q+1)=X(1,p+1)-WN^r*X(1,q+1);
38         end
39     end
```

```
40     X(1,:) = X(2,:); %obliczenia z podstawianiem
41 end
42 Xw = X(1,:);
```

Zaimplementować algorytm IFFT z podziałem w czasie. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function Xw=ifft_lab(xt);
2 %IFFT z podziałem czasowym
```

Obliczyć błąd rekonstrukcji dla funkcji `fft_lab` i `ifft_lab`.

Zaimplementować algorytmy FFT i IFFT z podziałem w częstotliwości. Przyjąć następujące deklaracje funkcji:

```
1 function Xw=fft_dif(xt);
2 %FFT z podziałem w częstotliwości

1 function Xw=ifft_dif(xt);
2 %IFFT z podziałem w częstotliwości
```

Ad 3. Widma sygnałów o wartościach rzeczywistych

Obliczyć widma dwóch sygnałów o długości N i wartościach rzeczywistych jednym N -punktowym FFT.

Obliczyć widmo sygnału o długości $2N$ i wartościach rzeczywistych jednym N -punktowym FFT.

Ad 4. Algorytm Goertzla obliczania DFT

Zaimplementować algorytm Goertzla obliczania DFT z odwróconą kolejnością próbek na wejściu.

Rozwiązanie

Program 2

```
1 close all, clear all, clc
2 N=16;
3 x=randn(1,N); %sygnał testowy
4 %% Algorytm Goertzla - odwrócona kolejność próbek na wejściu
5 xf=flip1r(x);
6 for k=1:N
7     WN_k=exp(-j*(2*pi/N)*(k-1));
8     for n=1:N
9         if n-1==0
```

```
10             y(n)=xf(n);
11         else
12             y(n)=xf(n)+y(n-1)*WN_k;
13         end
14     end
15 Yw(k)=y(n);
16 end
17 % sprawdzenie
18 Yfft=fft(x);
19 figure,
20 subplot(2,1,1), plot(real(Yw)-real(Yfft), '-.' ),
    xlabel('n'), ylabel('blad_R_E'),
21 subplot(2,1,2), plot(imag(Yw)-imag(Yfft), '-.' ),
    xlabel('n'), ylabel('blad_I_M'),
```

Zaimplementować algorytm Goertzla obliczania DFT z naturalną kolejnością próbek na wejściu.

Ad 5. Transformacja Chirp-Z

Zaimplementować algorytm transformacji Chirp-Z.

Ad 6. Analiza częstotliwościowa z wykorzystaniem DFT

Wygenerować przebieg $x[n] = DC + A \sin(2\pi f t + \varphi)$, gdzie składowa stała $DC = 1$, a częstotliwość $f = 20$ Hz, próbkowany z częstotliwością $F_s = 100$ Hz.

Dla tego sygnału obliczyć dyskretną transformację Fouriera (funkcją Matlaba `fft`) na podstawie $N = 32$ i $N = 64$ próbek. Widma amplitudowe dla obu przypadków przedstawić na jednym wykresie z osią częstotliwości wyskalowaną w Hz i osią OY wyskalowaną w wartościach amplitudy.

Na jednym wykresie przedstawić widmo amplitudowe sygnału o długości $N = 64$ próbki i widmo amplitudowe tego samego sygnału uzupełnionego zerami do długości $N = 1024$ próbki. Oś częstotliwości wyskalować w Hz, a oś OY w wartościach amplitudy.

Sygnał o długości $N = 64$ próbki przemnożyć (mnożenie indeksowe) przez okno Hamminga (funkcja Matlaba `hamming`), a następnie uzupełnić zerami do długości $N = 1024$ próbki. Narysować widmo amplitudowe tego sygnału. Dla porównania na tym samym wykresie narysować widmo amplitudowe sygnału o długości $N = 64$ próbki z oknem prostokątnym, po uzupełnieniu zerami do tej samej długości tj. $N = 1024$ próbki. Oś częstotliwości wyskalować w Hz.

Dla sygnału w postaci $x[n] = A \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$, $f_1 = 20$ Hz, $f_2 = 22$ Hz, częstotliwość próbkowania $F_s = 100$ Hz zaobserwować jego widmo amplitudowe, dla liczby próbek N z przedziału od 256 do 2000. Przed liczeniem widma uzupełnić sygnał zerami do długości $N = 2048$ próbek.

Rozwiązanie

Program 3 przedstawia możliwość zwiększenia rozdzielczości częstotliwościowej i amplitudowej DFT przez wydłużenie okna obserwacji.

Należy zwrócić uwagę, że przeciek widmowy może być znacznie ograniczony przez stosowanie okien czasowych innych niż prostokątne. Usunięcie znaku % w linii 14 powoduje zastosowanie okna Hamminga. Sygnał jest dzielony przez wartość średnią okna, żeby prążki DFT miały wysokość amplitudy sygnału.

Program 3

```

1 close all, clear all, clc
2 % Poprawa rozdzielczość przez wydłużenie obserwacji
3 Nx =[256:4:2000];
4 Nfft = 2048;
5 f1=20; A1=1; fi1=pi/7;
6 f2=23; A2=1; fi2=0;
7 Fs=1000;
8 f=(0:Nfft-1)*(Fs/Nfft);
9 for k=1:length(Nx)
10     t=(0:Nx(k)-1)/Fs;
11     x1=A1*sin(2*pi*f1*t+fi1);
12     x2=A2*sin(2*pi*f2*t+fi2);
13     x=x1+x2;
14     %w=hamming(length(x)); x=x(:).*w; x=x/mean(w);
15     Xw=fft(x,Nfft); Xw=2*Xw/Nx(k); Xw(1)=Xw(1)/2;
16     plot(f,abs(Xw),'.-');
17     title(['N=' num2str(Nx(k),'%2.0f')])
18     xlabel('f [Hz]')
19     ylabel('|X(e^j\omega)|')
20     axis([10 30 0 1.2]), grid on
21     drawnow
22 end

```

Dla sygnału w postaci $x[n] = A\sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + A\sin(2\pi f_2 t + \phi_2)$ o długości $N = 256$ próbek, $f_1 = 20$ Hz i częstotliwości próbkowania $F_s = 100$ Hz zaobserwować jego widmo amplitudowe, dla f_2 z przedziału od 21 Hz do 40 Hz. Przed liczeniem widma uzupełnić sygnał zerami do długości $N = 2048$ próbek.

Rozwiązanie

Program 4 przedstawia animację ilustrującą problem rozdzielczości częstotliwościowej DFT. Należy zwrócić uwagę, że nawet w przypadku, gdy częstotliwości f_1 i f_2 różnią się znacznie maksimum charakterystyki amplitudowej przeważnie nie leży w punkcie o współrzędnych (20Hz,1). Zjawisko to jest spowodowane przeciekiem widmowym.

Program 4

```
1 close all, clear all, clc
2 % Rozdzielczość częstotliwościowa DFT
3 Nx =256;
4 Nfft = 2048;
5 f1=20; A1=1; fi1=pi/7;
6 f2=21:0.05:40; A2=1; fi2=0;
7 Fs=1000;
8 t=(0:Nx-1)/Fs;
9 f=(0:Nfft-1)*(Fs/Nfft);
10 x1=A1*sin(2*pi*f1*t+fi1);
11 for k=1:length(f2)
12     x2=A2*sin(2*pi*f2(k)*t+fi2);
13     x=x1+x2;
14     Xw=fft(x,Nfft); Xw=2*Xw/Nx; Xw(1)=Xw(1)/2;
15     plot(f,abs(Xw),'.-');
16         title(['f_2=' num2str(f2(k),'%2.2f') ' Hz'])
17         xlabel('f [Hz]')
18         ylabel('|X(e^j\omega)|')
19         axis([0 50 0 1.5]), grid on
20         drawnow
21 end
```

Dla sygnału w postaci $x[n] = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$ o długości $N = 256$ próbek, $f_1 = 20$ Hz, $f_2 = 24$ Hz i częstotliwości próbkowania $F_s = 100$ Hz zaobserwować jego widmo amplitudowe, dla A_2 z przedziału od 0 do A_1 . Przed liczeniem widma uzupełnić sygnał zerami do długości $N = 2048$ próbek.

Rozwiązanie

Program 5 przedstawia animację ilustrującą problem rozdzielczości amplitudowej DFT. Należy zwrócić uwagę, że nawet w przypadku, gdy amplituda A_2 jest na tyle duża, że listek główny sygnału o częstotliwości f_2 nie jest maskowany przez listki boczne sygnału o częstotliwości f_1 , to listki główne obu tych sygnałów nie mają ekstremów w częstotliwościach f_1 i f_2 , co jest spowodowane przeciekiem widmowym.

Program 5

```
1 close all, clear all, clc
2 % Rozdzielczość amplitudowa
3 Nx =256;
4 Nfft = 2048;
5 f1=20; A1=1; fi1=pi/7;
6 f2=24; A2=0:0.01:1; fi2=0;
7 Fs=1000;
8 t=(0:Nx-1)/Fs;
9 f=(0:Nfft-1)*(Fs/Nfft);
10 x1=A1*sin(2*pi*f1*t+fi1);
11 for k=1:length(A2)
```

```

12     x2=A2(k)*sin(2*pi*f2*t+fi2);
13     x=x1+x2;
14     Xw=fft(x,Nfft); Xw=2*Xw/Nx; Xw(1)=Xw(1)/2;
15     plot(f,abs(Xw),'.-');
16     title(['A_2=' num2str(A2(k),'%2.2f')])
17     xlabel('f [Hz]')
18     ylabel('|X(e^j\omega)|')
19     axis([0 50 0 1.5]), grid on
20     drawnow
21 end

```

Ad 7. Okna Rifea-Vincenta klasy I i interpolowane DFT

Napisać funkcję do liczenia okien Rifea-Vincenta klasy I dla rzędów $M=0,1,2,\dots,6$. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```

1 function [okno, Am]=window_RV(N,ord);
2 %okna Rifea-Vincenta klasy I
3 %N - długość okna
4 %ord - rząd okna 0,1,2,...,6 0-prostokątne, 1-Hanning

```

Dla wybranej długości okna, np. $N = 32$, zaobserwować przebiegi czasowe okna oraz charakterystyki amplitudowe w skali decybelowej.

Napisać funkcję do liczenia interpolowanego DFT dla okien Rifea-Vincenta klasy I dla rzędów $M=0,1,2,\dots,6$. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```

1 function [Xw,w0,fi,Xw3p,w3p]=interp_dft_Rif_Vinc(x,ord);
2 % Interpolowane DFT dla okien Rifea-Vincenta klasy I
3 % x - sygnał
4 % ord- rząd okna 0,1,...,6, ord=0-okno prostokątne, ord=1-okno Hanninga
5 % Xw - amplituda, interpolacja dwupunktowa
6 % w0 - pulsacja [rad], interpolacja dwupunktowa
7 % fi - faza [rad]
8 % Xw3p- amplituda, interpolacja trzypunktowa
9 % w03p-pulsacja [rad], interpolacja trzypunktowa

```

Wyznaczyć błędy systematyczne estymacji częstotliwości dla dwupunktowej i trzypunktowej interpolacji DFT dla okien Rifea-Vincenta klasy I dla ustalonej długości sygnału, np. $N = 128$. Narysować zależność błędu maksymalnego estymacji częstotliwości od częstotliwości cyfrowej sygnału. Częstotliwość sygnału testowego zmieniać w przedziale $(0, \pi)$ z krokiem $\pi/20$. Dla ustalonej częstotliwości wygenerować sygnały testowe z fazą zmieniającą się w przedziale $(-\pi/2, \pi/2)$ z krokiem $\pi/20$; za **błąd** przyjąć maksymalną różnicę pomiędzy zadaną częstotliwością sygnału testowego, a częstotliwością estymowaną dla sygnałów o różnej fazie.

Ad 8. Spektrogram

Napisać funkcję liczącą spektrogram. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function [X,n_spe,w_spe]=spektrogram_lab(x,w,Nfft,R);
2 %x - sygnał
3 %w - okno czasowe - wektor o długości L
4 %Nfft - długość fft >= L
5 %R - przesunięcie okna
6 %X - spektrogram - płaszczyzna czas-częstotliwość
7 %n_spe - indeks czasu
8 %w_spe - pulsacja [rad]
```

Następnie użyć napisaną funkcję `spektrogram_lab` w programie 6 do obserwacji widma sygnału w czasie, dla modulacji amplitudy i modulacji częstotliwości. Dokonać obserwacji spektrogramu dla różnych długości okna prostokątnego i Hamminga oraz dla różnych przesunięć okna R .

Program 6

```
1 close all, clear all, clc
2 Nx=2048;
3 n=(0:Nx-1);
4 if 0 % modulacja AM
5     w0=1;
6     wm=0.01;
7     k =0.9;
8     x1=1+k*cos(wm*n);
9     x2=cos(w0*n);
10    x =x1.*x2;
11 else % modulacja FM
12     w0 = pi/2;
13     wm = 0.01;
14     k = 1;
15     x = cos(w0*n+k*cos(wm*n)/wm);
16 end
17 L = 128;
18 Nfft= 256;
19 R = 64;
20 w = ones(1,L);
21 %w = hamming(L);
22 [X,n_spe,w_spe]=spektrogram_lab(x,w,Nfft,R);
23 figure,
24     plot(x, '-k', 'LineWidth',1)
25     xlabel('n'), ylabel('x[n]')
```

```

26     axis tight
27 figure
28     imagesc(n_spe,w_spe,abs(X)), axis xy, colorbar
29     xlabel('n'), ylabel('\omega [rad]')
30     title(['L=' num2str(L) ', R=' num2str(R) ' ',
           N_F_F_T=' num2str(Nfft)])
31     axis tight

```

Zastosować napisaną funkcję spektrogram_lab do analizy wybranych sygnałów biomedycznych (np. EKG, EMG, sygnału mowy itp.) dla różnych długości, rodzajów i przesunięć okna analizy. Jakie charakterystyczne cechy (parametry) tych sygnałów można zaobserwować w dziedzinie czas-częstotliwość?

Ad 9. Periodogram i uśredniony periodogram

Napisać funkcję liczącą periodogram:

$$I[k] = \frac{1}{LU} |\text{DFT}\{w[n]x[n]\}|^2, U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} (w[n])^2. \quad (8)$$

Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```

1 function [Iw,w] =periodogram_lab(x,okno);
2 %x     - sygnał
3 %okno - wektor okna czasowego o długości sygnału
4 %I     - periodogram
5 %w     - pulsacja [rad]

```

Porównać wyniki z funkcją Matlabu periodogram wg programu 7.

Program 7

```

1 close all, clear all, clc
2 Nx=1024;
3 n=0:Nx-1;
4 x=sin(n*pi/4)+2.5*randn(1,Nx);
5 w=hamming(Nx);
6 %w=ones(Nx,1);
7 [Pxx,w1] = periodogram(x,w); Pw = Pxx*pi; Pw(1) =Pw(1)*2;
8 [Iw, w2] = periodogram_lab(x,w);
9 figure
10     subplot(2,1,1)
11         plot(n, x, '-k')
12         xlabel('n')
13         ylabel('x[n]')

```

```
14         axis tight, box on
15     subplot(2,1,2), hold on
16         plot(w2,Iw, '-k')
17         plot(w1,Pw, 'o-b')
18         xlabel('\omega'), ylabel('I(\omega)')
19         axis tight
```

Napisać funkcję liczącą uśredniony periodogram metodą Welch:

$$\hat{I}[k] = \frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} I_r[k], \quad (9)$$

gdzie $I_r[k]$ są periodogramami (4.8) dla kolejnych przesunięć okna analizy. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function [Iw,w] = periodogram_usredniony(x,okno,R, Nfft);
2 %x      - sygnał
3 %okno   - wektor okna czasowego
4 %Nfft   - długość FFT
5 %R      - przesunięcie okna (liczba próbek)
6 %I      - periodogram
7 %w      - pulsacja [rad]
```

Porównać wyniki z funkcją Matlaba `pwelch` wg programu 8.

Program 8

```
1 close all, clear all, clc
2 Nx=1024;
3 L =128;           %długość okna
4 R =round(L/2);   %przesunięcie
5 n=0:Nx-1;
6 x=sin(n*pi/4)+2.5*randn(1,Nx);
7 %w=hamming(L);
8 w=ones(L,1);
9 [Iw, w1] = periodogram_usredniony(x,w,R,Nx);
10 [Pxx,w2] = pwelch(x,w,L-R,Nx); Pxx=Pxx*pi; Pxx(1)=2*Pxx(1);
11 figure
12     subplot(2,1,1)
13         plot(n, x, '-k')
14         xlabel('n')
15         ylabel('x[n]')
16         axis tight, box on
17     subplot(2,1,2), hold on
```

```
18         plot(w1, Iw ,'.-k')
19         plot(w2, Pxx, 'o-b')
20         xlabel('\omega'), ylabel('I(\omega)')
21         axis tight, box on
```

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 5

Zmiana częstotliwości próbkowania sygnałów cyfrowych. Dyskretny sygnał analityczny. Dyskretna transformacja falkowa DWT

Program ćwiczenia

1. Zmiana częstotliwości próbkowania.
2. Zastosowanie dyskretnego sygnału analitycznego - demodulacja amplitudy i częstotliwości.
3. Obliczanie dyskretnego sygnału analitycznego metodą filtracji i modyfikacji widma.
4. Prosta i odwrotna transformacja falkowa w wersji predykcyjnej.
5. Wielopoziomowa, falkowa dekompozycja i synteza sygnału.
6. Funkcje bazowe DWT.
7. Reprezentacja sygnałów na płaszczyźnie czas-skala.

Zakres wymaganych wiadomości

Twierdzenie o próbkowaniu; zmiana częstotliwości próbkowania; filtr Hilberta; sygnał analityczny; transformacja falkowa.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T. P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Signal Processing Series, 1999.
- [4] *Matlab Signal Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.
- [5] *Matlab Wavelet Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zmiana częstotliwości próbkowania

Wygenerować sygnał testowy $x[n] = A \sin(2\pi f t + \varphi)$ o częstotliwości $f = 100$ Hz, długości $N = 256$, próbkowany z $F_s = 1000$ Hz. Napisać program do zmiany częstotliwości próbkowania tego sygnału z $F_s = 1000$ Hz na $F_s = 1200$ Hz.

Narysować przebiegi czasowe sygnału dla $F_s = 1000$ Hz i $F_s = 1200$ Hz na jednym wykresie z osią OX wyskalowaną w sekundach.

Narysować widma amplitudowe sygnału dla $F_s = 1000$ Hz i $F_s = 1200$ Hz na jednym wykresie z osią OX wyskalowaną w hercach.

Porównać wyniki z funkcją Matlaba `resample`.

Ad 2. Zastosowanie dyskretnego sygnału analitycznego - demodulacja amplitudy i częstotliwości

Zastosować dyskretny sygnał analityczny, obliczony funkcją Matlaba `hilbert`, do demodulacji amplitudy i częstotliwości sygnałów testowych zdefiniowanych w programie 6 w ćwiczeniu 4.

Ad 3. Obliczanie dyskretnego sygnału analitycznego metodą filtracji i modyfikacji widma

Napisać program do obliczania dyskretnego sygnału analitycznego metodą filtracji w dziedzinie czasu. Odpowiedź impulsowa idealnego filtra Hilberta dana jest wzorem:

$$h[n] = \begin{cases} \frac{2 \sin^2(\pi n/2)}{\pi n}, & n \neq 0 \\ 0, & n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Zastosować wyznaczony sygnał analityczny do demodulacji amplitudy i częstotliwości sygnałów testowych z programu 6 w ćwiczeniu 4.

Napisać program do obliczania dyskretnego sygnału analitycznego metodą modyfikacji widma:

$$Z[k] = \begin{cases} X[k], & k = 0 \\ 2X[k], & k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ X[k], & k = \frac{N}{2} \\ 0, & k = \frac{N}{2} + 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (2)$$

Zastosować wyznaczony sygnał analityczny do demodulacji amplitudy i częstotliwości sygnałów testowych z programu 6 w ćwiczeniu 4.

Ad 4. Prosta i odwrotna transformacja falkowa w wersji predykcyjnej

Napisać funkcję implementującą transformację falkową w wersji predykcyjnej z opcją transformacji całkowitoliczbowej.

Rozwiązanie

Program 1

```
1 function [c,d,P,U]=lwt_lab(x,P,U,int);
2 %LWT x musi mieć parzystą długość
3 %P,U - numer predyktora i updata od 1 do 4;
4 %int=1 - transformacja całkowitoliczbowa
5
6 switch P
7     case 1
8         P=[1];
9     case 2
10        P=[1/2 1/2];
11    case 3
12        P=[-1/2^4 9/2^4 9/2^4 -1/2^4];
13    case 4
14        P=[3/2^8 -25/2^8 150/2^8 150/2^8 -25/2^8 3/2^8];
15    otherwise
16        P=[1/2 1/2];
17 end
18 switch U
19     case 1
20         U=[1];
21     case 2
22         U=[1/2 1/2];
23     case 3
24         U=[-1/2^4 9/2^4 9/2^4 -1/2^4];
25     case 4
26         U=[3/2^8 -25/2^8 150/2^8 150/2^8 -25/2^8 3/2^8];
27     otherwise
28         U=[1/2 1/2];
29 end
30 x=x(:); N=length(x);
31 %% podział
32 ce=x(1:2:N);
33 co=x(2:2:N);
34 %% predykcja
35 if int==1
36     d = co-round(lwt_step(ce,P));
37 else
38     d = co-lwt_step(ce,P);
39 end
40 %% uaktualnienie
41 if int==1
42     c = ce+round(lwt_step(d,U)/2);
43 else
44     c = ce+lwt_step(d,U)/2;
```

```

45 end

1 function y=lwt_step(x,F);
2 % predykcja lub update, F - współczynniki P lub U
3 % na brzegu sygnału F=1
4 Nf=length(F);
5 N = length(x);
6 temp = conv(x,F);
7 if Nf==1
8     y=x;
9 else
10    y=[x(1:Nf/2-1);temp(Nf/2:N-Nf/2-1);x(N-Nf/2:N)];
11 end
    
```

Napisać funkcję implementującą odwrotną transformację falkową w wersji predykcyjnej z opcją transformacji całkowitoliczbowej. Zastosować następującą deklarację funkcji:

```

1 function x=ilwt_lab(c,d,P,U,int);
2 %odwrotna LWT
3 %P,U predyktor i update z funkcji lwt_lab
4 %int=1 transformacja całkowitoliczbowa
    
```

Sprawdzić błąd rekonstrukcji sygnału dla transformacji zmiennoprzecinkowej i całkowitoliczbowej w programie 2.

Program 2

```

1 close all, clear all, clc
2 %% generator sygnału EKG
3 x = ecg(128);
4 x = repmat(x,[1 9]);
5 x = x+0.05*randn(size(x)); %szum pomiarowy
6 x = sgolayfilt(x,0,5); %wygładzenie
7 %% kwantowanie na Lb bitów
8 Lb=8;
9 x = x-min(x); x=x/max(x); x=round((2^Lb-1)*x);
10 %% Transformacja falkowa
11 P=2;
12 U=2;
13 int=0;
14 [c,d,P1,U1] = lwt_lab(x,P,U,int); %analiza
15 xr = ilwt_lab(c,d,P1,U1,int); %synteza
16 blad=x(:)-xr(:);
17 figure
18 subplot(2,1,1)
19 plot(x);
20 xlabel('n')
21 ylabel('x[n]')
    
```

```
22         axis tight,
23     subplot(2,1,2)
24         plot(blad, '-k')
25         xlabel('n')
26         ylabel('x[n]-x_r[n]')
27         axis tight
```

Ad 5. Wielopoziomowa, falkowa dekompozycja i synteza sygnału

Napisać funkcję do wielopoziomowej falkowej dekompozycji sygnału.

Rozwiązanie

Program 3

```
1 function [c,dall,P1,U1]=lwt_level(x,P,U,int,lv);
2 %Wielopoziomowa dekompozycja LWT
3 %długość x musi dzielić się przez 2^lv
4 %P,U - numer predyktora i update od 1 do 4;
5 %int=1 - transformacja całkowitoliczbowa
6 %lv - liczba poziomów dekompozycji
7
8 c=x;
9 dall=[];
10 for k=1:lv
11     [c,d,P1,U1]=lwt_lab(c,P,U,int);
12     dall=[d; dall];
13 end
```

Napisać funkcję do wielopoziomowej falkowej syntezy sygnału. Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function c=ilwt_level(c,dall,P,U,int,lv);
2 %Wielopoziomowa synteza LWT
3 %długość x musi dzielić się przez 2^lv
4 %P,U predyktor i update z funkcji lwt_lab
5 %int=1 - transformacja całkowitoliczbowa
6 %lv - liczba poziomów dekompozycji
```

Sprawdzić błąd rekonstrukcji sygnału dla dekompozycji i analizy wielopoziomowej analogicznie jak w programie 2.

Ad 6. Funkcje bazowe DWT

Napisać program do rysowania falki i funkcji skalującej.

Ad 7. Reprezentacja sygnałów na płaszczyźnie czas-skala

Napisać program do rysowania płaszczyzny czas-skala dla wielopoziomowej, dyskretnej analizy falkowej sygnału.

Rozwiązanie**Program 4**

```

1 close all, clear all, clc
2 %% generator sygnału EKG
3 x = ecg(128);
4 x = repmat(x, [1 9]);
5 x = x+0.05*randn(size(x)); %szum pomiarowy
6 x = sgolayfilt(x,0,5); %wygładzenie
7 %% kwantowanie na Lb bitów
8 Lb=8; x = x-min(x); x=x/max(x); x=round((2^Lb-1)*x);
9 %% LWT
10 P=2; U=2;
11 lv = 5;
12 int=0;
13 [c,dall,P1,U1]=lwt_level(x,P,U,int,lv);%analiza wielopoziomowa
14 %% Prezentacja detali na płaszczyźnie czas-skala
15 k1=1;
16 Nc = length(c);
17 TS = zeros(lv,length(c)+length(dall));
18 for k=1:lv
19     d = dall(k1:k1+Nc-1); k1=k1+Nc; Nc=2*Nc;
20     d=repmat(d(:), [1 2^(lv-k+1)]); d=d.'; d=d(:);
21     TS(lv-k+1, :)=d.';
22 end
23 figure
24     imagesc(abs(TS)), axis xy, colorbar
25     xlabel('n')
26     ylabel('j')
27     axis tight

```

Dla wybranych sygnałów biomedycznych wyznaczyć ich reprezentacje typu czas-skala dla różnych systemów falkowych. Porównać te reprezentacje ze spektrogramami wyznaczonymi w ćwiczeniu 4 w punkcie 8. Jakie są główne różnice pomiędzy reprezentacją falkową sygnału na płaszczyźnie czas-skala, a reprezentacją fourierowską na płaszczyźnie czas-częstotliwość?

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 6

Filtry adaptacyjne. Kompresja sygnałów

Program ćwiczenia

1. Filtracja RLS (*Recursive Least Squares*).
2. Filtracja LMS (*Least Mean Squares*).
3. Identyfikacja odpowiedzi impulsowej układu i adaptacyjne usuwanie zakłóceń.
4. Obliczanie entropii; entropia sygnałów.
5. Kodowanie entropijne.
6. Kompresja stratna.

Zakres wymaganych wiadomości

Filtry adaptacyjne RLS i LMS; entropia Shannona; kodowanie transformacyjne; kodowanie Huffmana; kodowanie arytmetyczne; kompresja stratna.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T. P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] T. K. Moon, W. C. Stirling. *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*. Prentice Hall, 1999.
- [4] Matlab Filter Design Toolbox, dostępne na www.mathworks.com.
- [5] A. Drozdek. *Wprowadzenie do kompresji danych*. WNT, Warszawa, 1999.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Filtracja RLS

Napisać funkcję realizującą algorytm filtra adaptacyjnego RLS. Algorytm RLS jest następujący:

I. Inicjalizacja

1. Wybór długości filtra M ,
2. Początkowe współczynniki filtra można ustawić na zero $\mathbf{h}_0 = \mathbf{0}$,

3. Początkowa macierz odwrotna $\mathbf{P}_0 = \delta^{-1} \mathbf{I}$, gdzie δ jest małą wartością dodatnią.
 II. Obliczenia dla $N=1,2,3,\dots$

1. $\mathbf{k}_N = \frac{\lambda^{-1} \mathbf{P}_{N-1} \mathbf{x}_N}{1 + \lambda^{-1} \mathbf{x}_N^H \mathbf{P}_{N-1} \mathbf{x}_N}$,
2. $e_N = d_N - \mathbf{x}_N^H \mathbf{h}_{N-1}$,
3. $\mathbf{h}_N = \mathbf{h}_{N-1} + \mathbf{k}_N e_N$,
4. $\mathbf{P}_N = \lambda^{-1} \mathbf{P}_{N-1} - \lambda^{-1} \mathbf{k}_N \mathbf{x}_N^H \mathbf{P}_{N-1}$,

gdzie λ jest współczynnikiem zapominania o wartości równej 1 lub niewiele mniejszej. Dla $\lambda = 1$ filtr RLS jest równoważny blokowym obliczeniom LS (*least squares*), a dla $\lambda < 1$ najstarsze próbki są zaniechane wykładniczo.

Rozwiązanie

Program 1

```

1 function [hrls, h_n, e_n] = rls_lab(x,d,hrls,delt,lam);
2 %Filtr adaptacyjny RLS
3 %x      - sygnał wejściowy
4 %d      - sygnał odniesienia
5 %lam    - współczynnik zapominania 0<lam<=1
6 %hrls   - początkowe współczynniki filtra
7 %delt   - mała wartość dodatnia np.0.01
8 %h_n    - kolejne wektory współczynników filtra
9 %e_n    - kolejne wartości błędu
10 hrls=hrls(:);
11 ilam = 1/lam;
12 M = length(hrsls) ;
13 P = 1/delt*eye(M,M);
14 xn = zeros(M,1);
15 h_n=hrsls;
16 e_n=[];
17 for k=1:min([length(x), length(d)])
18     xn = [xn(2:M); x(k)];
19     kn= (ilam*P*xn)/(1+ilam*xn'*P*xn);
20     e = d(k)-xn'*hrsls;      e_n = [e_n e];
21     hrsls = hrsls + kn*e;    h_n = [h_n hrsls];
22     P = ilam*P - ilam*kn*xn'*P;
23 end
    
```

Ad 2. Filtracja LMS

Napisać funkcję realizującą algorytm filtra adaptacyjnego LMS. Algorytm LMS jest następujący:

I. Inicjalizacja

1. Wybór długości filtra M ,
 2. Początkowe współczynniki filtra można ustawić na zero $\mathbf{h}_0=\mathbf{0}$,
 3. Wybór wartości μ .
- II. Obliczenia dla $N = 1,2,3,\dots$
1. $e_N = d_N - \mathbf{x}_N^T \mathbf{h}_{N-1}$,
 2. $\mathbf{h}_N = \mathbf{h}_{N-1} + \mu \mathbf{x}_N e_N$.

Przyjąć następującą deklarację funkcji:

```
1 function [hlms, h_n, e_n] = lms_lab(x,d,hlms,mi);
2 %Filtr adaptacyjny LMS
3 %x      - sygnał wejściowy
4 %d      - sygnał odniesienia
5 %hlms   - współczynniki filtra
6 %mi     - krok adaptacji, np.0.01
7 %h_n    - kolejne wektory współczynników filtra
8 %e_n    - kolejne wartości błędu
```

Ad 3. Identyfikacja odpowiedzi impulsowej układu i adaptacyjne usuwanie zakłóceń

Zastosować napisane funkcje `rls_lab` i `lms_lab` do identyfikacji odpowiedzi impulsowej układu zgodnie z programem 2.

Program 2

```
1 close all, clear all, clc
2 %% identyfikacja odpowiedzi impulsowej h[n]
3 h = fir1(10,0.5); %odpowiedź impulsowa do identyfikacji
4 x = randn(1,500); %wymuszenie
5 d = conv(x,h); %odpowiedź układu identyfikowanego na x
6 d = d + 0.1*randn(size(d)); %pomiar odpowiedzi zakłócony szumem
7 %% zadanie: zastosować RLS i LMS do wyznaczenia h na podstawie x i d
```

Pomiarowy sygnał biomedyczny, np. EKG, zakłócić addytywnie sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz; następnie zastosować napisane funkcje `rls_lab` i `lms_lab` do usunięcia tego zakłócenia.

Ad 4. Obliczanie entropii; entropia sygnałów

Napisać funkcję do liczenia entropii dla wektora liczb całkowitych wg wzoru:

$$H(p_1, \dots, p_N) = H(S) = -\sum_{n=1}^N p_n \log_2 p_n, \quad (1)$$

gdzie $S = \{x_1, \dots, x_N\}$ jest zbiorem N niezależnych zdarzeń, a $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ zbiorem prawdopodobieństw ich zajścia (rozkładem prawdopodobieństwa).

Obliczyć entropię pomiarowego sygnału biomedycznego (np. EKG) o długości $N=4096$. Obliczyć entropię tego sygnału po kodowaniu różnicowym:

$$x[n] = \begin{cases} x[n], & n = 1 \\ x[n] - x[n-1], & n > 1 \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Obliczyć entropię tego sygnału na 5 poziomie całkowitoliczbowej dekompozycji falkowej.

Ad 5. Kodowanie entropijne

Zakodować koderem Huffmana i koderem arytmetycznym pomiarowy sygnał biomedyczny (np. EKG) o długości $N = 4096$. Określić średnią liczbę bitów na symbol dla każdego z koderów, liczby te porównać z entropią sygnału.

Ad 6. Kompresja stratna

Wykonać pięciopoziomową, całkowitoliczbową dekompozycję falkową pomiarowego sygnału biomedycznego (np. EKG) o długości $N = 4096$. Współczynniki detali, których amplituda jest mniejsza od wartości przyjętego progu T_r ustawić na wartość zero. Obliczyć entropię współczynników falkowych po operacji progowania. Obliczyć błąd PRD (*Percent Residual Difference*) rekonstrukcji sygnału:

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_n (x[n] - x_r[n])^2}{\sum_n x[n]^2}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Dla zwiększanych wartości progu $T_r = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ wyznaczyć charakterystykę $PRD = f\{H\}$ obrazującą zależność pomiędzy współczynnikiem kompresji, a błędem rekonstrukcji, tj. jakością kompresji stratnej.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 7

Filtracja obrazów. DFT i DWT obrazów

Program ćwiczenia

1. Odszumianie i wygładzanie obrazów.
2. Widmo 2D.
3. Separowalny filtr FIR LP i HP.
4. Cylindryczny filtr FIR LP i HP.
5. Filtry do detekcji krawędzi.
6. Wyznaczanie odpowiedzi impulsowej filtra 2D przez IDFT.
7. Obliczanie 2D DFT.
8. Filtracja 2D przez DFT.
9. Analiza falkowa obrazów.
10. Funkcje bazowe 2D DWT.

Zakres wymaganych wiadomości

Filtry dwuwymiarowe 2D FIR separowalne i cylindryczne; filtr medianowy 2D; Filtry do detekcji krawędzi; widmo 2D; DFT i DWT obrazów.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] T. P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, od teorii do zastosowań*. WKiŁ, Warszawa, 2005.
- [3] J. S. Lim. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990.
- [4] *Matlab Image Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Odszumianie i wygładzanie obrazów

Wygenerować obraz testowy $I = \text{checkerboard}(60, 2, 2)$ i zakłócić go addytywnie szumem.

Przefiltrować obraz testowy filtrami uśredniającymi 2D: filtrem Gaussa, filtrem o prostokątnej odpowiedzi impulsowej i filtrem o odpowiedzi impulsowej w kształcie dysku. Użyć funkcji Matlab'a `imfilter` lub `conv2`. Przefiltrować obraz testowy filtrem medianowym, funkcja Matlab'a `medfilt2`. Powtórzyć eksperymenty dla obrazu naturalnego (`np. I = imread('cameraman.tif')`).

Ad 2. Widmo 2D

Napisać funkcję liczącą ciągle widmo 2D obrazu.

Rozwiązanie

Program 1

```
1 function [Xw,w1,w2]=fourier_ciagly_2D(x,dw,wz);
2 % 2D FT
3 for k=1:size(x,1)
4     [H, w1]=fourier_ciagly(x(k,:),dw,wz);
5     Xw1(k,:)= H;
6 end
7 for k=1:size(Xw1,2)
8     [H, w2]=fourier_ciagly(Xw1(:,k),dw,wz);
9     Xw(:,k)= H(:);
10 end
```

Funkcja `fourier_ciagly_2D` liczy transformację Fouriera wierszy a następnie kolumn obrazu za pomocą funkcji `fourier_ciagly` dla sygnałów 1D.

Program 2

```
1 function [Xw, w]=fourier_ciagly(x,dw,wz);
2 %ciągła transformacja Fouriera sygnałów dyskretnych
3 %dw - krok częstotliwości [rad]
4 %wz=[w1 w2]- zakres częstotliwości [rad]
5 %x - sygnał
6 %Xw - widmo sygnału x
7 %w - pulsacje, dla których wyznaczono widmo Xw
8 %
9 %przykładowe wywołanie
10 %[Xw, w]=fourier_ciagly(x,0.01,[-pi pi]);
11
12 w=wz(1):dw:wz(2);
13 nn=0:1:length(x)-1;
14 for k=1:length(w)
15     Xw(k)=exp(-j*w(k)*nn)*x(:);
16 end
```

Ad 3. Separowalny filtr FIR LP i HP

Zaprojektować separowalny filtr dolnoprzepustowy o rozmiarze 11×11 o częstotliwości odcięcia $\pi/4$. Narysować odpowiedź impulsową i charakterystykę amplitudową tego filtra funkcją Matlab'a `surf`. Przefiltrować tym filtrem obrazy testowe z punktu 1.

Zaprojektować separowalny filtr górnoprzepustowy o rozmiarze 11×11 o częstotliwości odcięcia $\pi/4$. Narysować odpowiedź impulsową i charakterystykę amplitudową tego filtra. Przefiltrować tym filtrem obrazy testowe z punktu 1.

Ad 4. Cylindryczny filtr FIR LP i HP

Zaprojektować cylindryczny filtr dolnoprzepustowy o rozmiarze 11×11 o częstotliwości odcięcia $\pi/4$. Narysować odpowiedź impulsową i charakterystykę amplitudową tego filtra. Przefiltrować tym filtrem obrazy testowe z punktu 1.

Zaprojektować cylindryczny filtr górnoprzepustowy o rozmiarze 11×11 o częstotliwości odcięcia $\pi/4$. Narysować odpowiedź impulsową i charakterystykę amplitudową tego filtra. Przefiltrować tym filtrem obrazy testowe z punktu 1.

Ad 5. Filtry do detekcji krawędzi

Przefiltrować obrazy testowe z punktu 1 filtrami do detekcji krawędzi.

Ad 6. Wyznaczanie odpowiedzi impulsowej filtra 2D przez IDFT

Za pomocą IDFT 2D (funkcja Matlab'a `ifft2`) wyznaczyć odpowiedź impulsową dolnoprzepustowego filtra cylindrycznego o częstotliwości odcięcia $\pi/4$.

Rozwiązanie

Program 3

```
1 close all, clear all, clc
2 %% Projektowanie filtra cylindrycznego w dziedzinie DFT
3 N = 256;      %rozmiar widma 2*N x 2*N
4 w = pi/4;    %częstotliwość odcięcia [rad]
5 R = N*w/pi;
6 Hw=zeros(2*N,2*N);
7 for k1=1:2*N
8     for k2=1:2*N
9         promien=sqrt((N-k1+1)^2+(N-k2+1)^2);
10            if promien<R
11                Hw(k1,k2)=1;
12            end
```

```

13     end
14 end
15 %Hw=~Hw; %HP
16 phil=exp(-j*(1:2*N)*pi); %liniowa faza
17 phi2=exp(-j*(1:2*N)*pi); %liniowa faza
18 Hw=Hw.*(phil(:)*phi2);
19 hr=ifft2(fftshift(Hw));
20 hr=real(hr);
21 %% sprawdzenie
22 Nh = 8;      %rozmiar filtra 2*Nh x 2*Nh
23 k1 = 64;    %rozmiar widma
24 h=hr(N-Nh+1:N+Nh,N-Nh+1:N+Nh);%fragment odpowiedzi impulsowej
25 h=h.*(hamming(2*Nh)*hamming(2*Nh)'); %okno czasowe
26 hz=zeros(k1,k1); hz(1:2*Nh,1:2*Nh)=h; %zagęszczenie
próbkowania osi częstotliwości
27 Hzw=fft2(hz);
28 Hzw=fftshift(Hzw);
29 w=2*pi*((0:k1-1)-k1/2)/k1;
30 figure
31     surf(h)
32     xlabel('n_1'), ylabel('n_2'), zlabel('h[n_1,n_2]')
33     axis tight, box on
34 figure,
35     surf(w,w,abs(Hzw)), alpha(0.5)
36     xlabel('\omega_1'), ylabel('\omega_2')
37     zlabel('|X(\omega_1,\omega_2)|')
38     axis tight, box on

```

Ad 7. Obliczanie 2D DFT

Napisać funkcję do liczenia DFT sygnałów 2D z wykorzystaniem funkcji Matlabu `fft`. Zamienić ćwiartki płaszczyzny $X[k_1, k_2]$ tak, aby składowa stała $X[0,0]$ była w środku płaszczyzny, w tym celu użyć funkcji Matlabu `fftshift`. Zaobserwować widmo obrazu naturalnego (np. `I = imread('cameraman.tif')`) o rozmiarze 256 x 256 w skali liniowej i skali decybelowej. Zaobserwować widmo obrazu naturalnego po odjęciu wartości średniej, tj. składowej stałej. Zaobserwować widmo obrazu naturalnego z oknem separowalnym (np. Hamminga). Zwiększyć gęstość próbkowania osi częstotliwości ω_1 i ω_2 przez uzupełnienie obrazu zerami do rozmiaru 512 x 512.

Ad 8. Filtracja 2D przez DFT

Przefiltrować dolnoprzepustowo obraz naturalny w dziedzinie częstotliwości, tzn. policzyć widmo obrazu, zmodyfikować właściwe współczynniki widma $X[k_1, k_2]$ i wrócić do dziedziny czasu za pomocą funkcji Matlabu `ifft2`.

Ad 9. Analiza falkowa obrazów

Napisać program do wielopoziomowej, falkowej dekompozycji i rekonstrukcji obrazów. DWT 2D zaimplementować w postaci predykcyjnej z opcją transformacji całkowitoliczbowej.

Rozwiązanie

Program 4 wykorzystuje funkcje `lwt2d` i `ilwt2d`. Implementacje funkcji `lwt_lab` i `lwt_step` podane są w ćwiczeniu 5 w programie 1.

Program 4

```
1 close all, clear all, clc
2 Ao = double(imread('cameraman.tif'));
3 Lv=3; %poziom dekompozycji
4 P=2; U=2; int=1;
5 %% Dekompozycja
6 A = double(Ao);
7 AA = A;
8 for k=1:Lv
9 [AA, AD, DD, DX, P1, U1]=lwt2d(AA,P,U,int);
10     temp=[AA AD; DD DX]; [n1, n2]=size(temp);
11     A(1:n1,1:n2)=temp;
12     figure,imshow(uint8(A));
13 end
14 %% Rekonstrukcja
15 [n1,n2]=size(A);
16 n1=n1/2^Lv;
17 n2=n2/2^Lv;
18 for k=1:Lv
19     AA = A(1:n1 , 1:n2);
20     AD = A(1:n1 , 1+n2:2*n2);
21     DD = A(1+n1:2*n1, 1:n2);
22     DX = A(1+n1:2*n1 , 1+n2:2*n2);
23     AR=ilwt2d(AA, AD, DD, DX, P1, U1, int);
24     A(1:2*n1,1:2*n2)=AR;
25     n1=2*n1;
26     n2=2*n2;
27 end
28 blad=sum(abs(A(:)-Ao(:)))
```

Program 5

```
1 function [AA, AD, DD, DX, P1, U1]=lwt2d(B,P,U,int);
2 %Dekompozycja falkowa obrazów
3 % AA | DD
4 % -----
```

```

5 % AD | DX
6
7 [n1 n2]=size(B); k=round(n2/2); w=round(n1/2);
8 A=zeros(n1,k);
9 D=zeros(n1,k);
10 AA=zeros(w,k); AD=AA; DD=AA; DX=AA;
11 for n=1:n1
12     [A(n,:),D(n,:),P1,U1]=lwt_lab(B(n,:),P,U,int);
13 end
14 [n1 n2]=size(A);
15 for n=1:n2
16     [a,d]=lwt_lab(A(:,n),P,U,int);
17     AA(:,n)=a;
18     AD(:,n)=d;
19 end
20 for n=1:n2
21     [a,d]=lwt_lab(D(:,n),P,U,int);
22     DD(:,n)=a;
23     DX(:,n)=d;
24 end

```

Program 6

```

1 function B=ilwt2d(AA, AD, DD, DX, P1, U1, int);
2 %Rekonstrukcja falkowa obrazów
3 % AA | DD
4 % -----
5 % AD | DX
6
7 [n1 n2]=size(AA);
8 A=zeros(2*n1,n2); D=A;
9 B=zeros(2*n1,2*n2);
10 for n=1:n2
11     a=DD(:,n);
12     d=DX(:,n);
13     x=ilwt_lab(a(:,n),d(:,n),P1,U1,int);
14     D(:,n)=x(:,n);
15 end
16 for n=1:n2
17     a=AA(:,n);
18     d=AD(:,n);
19     x=ilwt_lab(a(:,n),d(:,n),P1,U1,int);
20     A(:,n)=x(:,n);
21 end
22 [n1 n2]=size(A);
23 for n=1:n1
24     B(n,:)=ilwt_lab(A(n,:),D(n,:),P1,U1,int);
25 end

```

Program 7

```
1 function x=ilwt_lab(c,d,P,U,int);
2 %odwrotna LWT
3 %P,U predyktor i update z funkcji lwt_lab
4 %int=1 transformacja całkowitoliczbowa
5
6 c=c(:);
7 d=d(:);
8 % odwrócenie uaktualnienia
9 if int==1
10     ce = c-round(lwt_step(d,U)/2);
11 else
12     ce = c-lwt_step(d,U)/2;
13 end
14 % odwrócenie predykcji
15 if int==1
16     co = d+round(lwt_step(ce,P));
17 else
18     co = d+lwt_step(ce,P);
19 end
20 % łączenie
21 N=2*length(c);
22 x = zeros(N,1);
23 x(1:2:N)=ce;
24 x(2:2:N)=co;
```

Ad 10. Funkcje bazowe 2D DWT

Korzystając z algorytmu rekonstrukcji 2D DWT narysować dwuwymiarową funkcję skalującą oraz falkę poziomą, wertykalną i diagonalną.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

Ćwiczenie 8

Transformacja Radona

Program ćwiczenia

1. Odwrotna transformacja Radona.
2. Detekcja linii.
3. Implementacja odwrotnej transformacji Radona.

Zakres wymaganych wiadomości

Transformacja Radona; odwrotna transformacja Radona.

Literatura

- [1] K. Duda. *Analiza sygnałów biomedycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
- [2] *Matlab Image Processing Toolbox*, dostępne na www.mathworks.com.
- [3] A. C. Kak, M. Slaney. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press, 1988.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Odwrotna transformacja Radona

Za pomocą funkcji Matlab'a `phantom` wygenerować model Sheppa i Logana przekroju głowy o rozmiarze 256 x 256 pikseli. Wyznaczyć transformatę Radona tego modelu funkcją Matlab'a `radon`, a następnie zrekonstruować obraz za pomocą funkcji Matlab'a `iradon`. Zaobserwować błąd rekonstrukcji dla różnych liczb projekcji transformacji Radona dla kąta Θ z przedziału $[0, 180)$.

Ad 2. Detekcja linii

Napisać program do detekcji linii w obrazie wykorzystujący transformację Radona.

Rozwiązanie

Program 1

```
1 close all, clear all, clc
2 %% Syntetyczny obraz testowy zawierający linie
3 N=128;
4 I=zeros(N,N);
5 I(110,:)=ones(N,1); %linia pozioma
6 a=[0 0.4 -0.3 0.1 -0.5];
7 b=[120 20 N-10 3 N-2];
8 for k1=1:length(a);
9   x=1:N; y=a(k1)*x+b(k1); y=round(y);
10      for k2=1:N;
11          if y<=N & y>0
12              I(x(k2),y(k2))=1;
13          end
14      end
15 end
16 %% Obraz naturalny
17 % I = imread('cameraman.tif');
18 % h = fspecial('prewitt');
19 % h=h.';
20 % I = imfilter(I,h, 'replicate','same');
21 %% Transformacja Radona
22 dte=1; theta = 0:dte:180-dte;
23 [R,xp] = radon(I,theta);
24 %% Detekcja linii tj. maksimów transformaty Radona
25 NL=8; %liczba linii
26 x=1:size(I,2); x=x-size(I,2)/2;
27 y=1:size(I,1); y=y-size(I,1)/2;
28 figure(1), hold on
29     imagesc(theta,xp,R); colorbar
30     title(['P_{\theta} (t), d\theta=' num2str(dte)]);
31     xlabel('\theta'); ylabel('t'); axis tight
32 figure(2); hold on
33     imagesc(x,y,I), colormap gray
34     set(gca,'YDir','reverse')
35     axis tight, box on, axis on
36 for k=1:NL
37     [val, ind] = max(R(:));
38     [n1,n2] = ind2sub(size(R),ind);
39     % wyznaczenie parametrów prostej
40     if theta(n2)==0 %prosta równoległa do OY
41         x_line=ones(size(y))*xp(n1);
42         y_line=y;
43     elseif theta(n2)==90 %prosta równoległa do OX
44         y_line=-ones(size(y))*xp(n1);
```

```
45         x_line=y;
46     else
47         a=-tand(theta(n2)+90);
48         b=xp(n1)/sind(theta(n2));
49         y_line=a*x-b;
50         ind1=find(y_line<min(y) | y_line>max(y));
51         y_line(ind1)=[]; x_line=x; x_line(ind1)=[];
52     end
53     figure(1),plot(theta(n2),xp(n1),'ow','MarkerSize',15),
54     figure(2),plot(x_line,y_line,'g')
55     R(n1,n2)=0; %usunięcie aktualnego maksimum
56 end
```

Ad 3. Implementacja odwrotnej transformacji Radona

Napisać program implementujący odwrotną transformację Radona wykorzystujący twierdzenie Fouriera o przekrojach i algorytm *filtered backprojection*.

Wykaz aparatury

1. Komputer PC z programem Matlab.

POMIARY PARAMETRÓW RUCHU DROGOWEGO

opracowali

dr hab. inż. Ryszard Sroka

dr inż. Tadeusz Żegleń

Ćwiczenie 1

Badanie właściwości systemu radarowego przeznaczonego do pomiarów parametrów pojazdów

Program ćwiczenia

1. Zasilenie urządzenia i obserwacja wyników autotestu.
2. Konfigurowanie urządzenia i sprawdzenie jego działania w warunkach laboratoryjnych.
3. Odczyt danych z urządzenia.
4. Konfigurowanie i praca urządzenia w warunkach terenowych.
5. Analiza zebranych danych pomiarowych.
6. Weryfikacja dokładności pomiaru prędkości i klasyfikacji pojazdów.

Zakres wymaganych wiadomości

Zasady działania radarów. Efekt Dopplera. Właściwości, zalety i ograniczenia metod radarowych. Podstawy pomiarów parametrów pojazdów. Globalne parametry opisujące ruch drogowy.

Literatura

- [1] User manual of Radar Traffic Classifier SDR.
- [2] Materiały pomocnicze dostępne na stronie internetowej Katedry Metrologii AGH.
- [3] J. Gajda i inni. *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

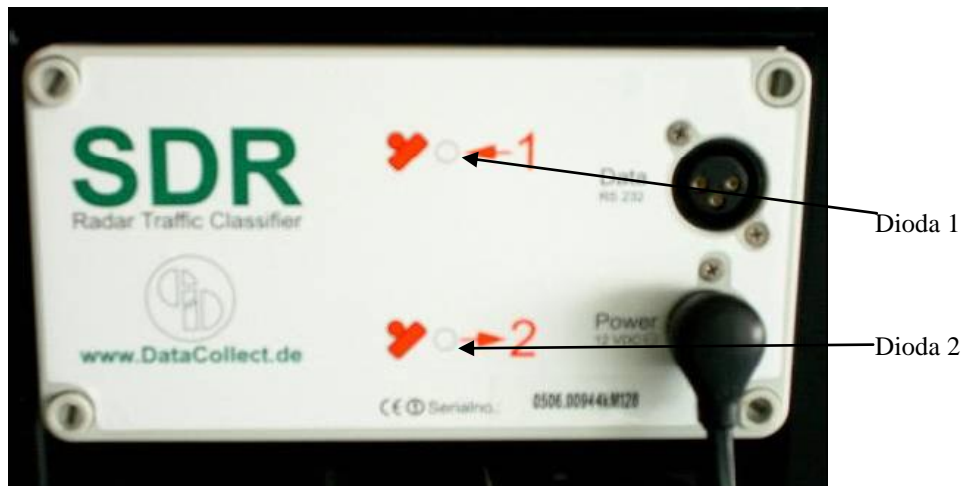
Ad 1. Zasilenie urządzenia i obserwacja wyników autotestu

Zamocować na statywie uchwyt do mocowania urządzenia SDR. Sprawdzić stabilność statywu. Zamontować urządzenie na uchwycie i ustawić blokadę mechaniczną.

Podłączyć akumulator do gniazda oznaczonego *Power* (patrz rys. 1). Po podłączeniu obie diody powinny zapalić się na ok. 10 sekund (sprawdzany jest stan baterii). Stan baterii sygnalizowany jest w następujący sposób:

1. Migająca górna dioda: bateria w pełni naładowana,

2. Migające obie diody: bateria częściowo naładowana (wystarczy na ok. 3 dni pracy urządzenia),
3. Migająca dolna dioda: bateria bliska wyładowania (wystarczy na 24h pracy).



Rys. 1. Płyta czołowa urządzenia radarowego.

Kolejna informacja zgłaszana przez stan diod na płycie czołowej urządzenia dotyczy obsługiwanych pasów ruchu (znaczenie numeru pasa patrz [1]):

1. Zapalona górna dioda: obsługiwany jest pas (kierunek) nr 1 - zbliżanie się pojazdu do radaru,
2. Zapalona dolna dioda: obsługiwany jest pas (kierunek) nr 2 - oddalanie się pojazdu od radaru.
3. Zapalone obie diody: obsługiwane są pasy (kierunki) ruchu 1 i 2,

Zanotować stan i aktualną konfigurację urządzenia.

Ad 2. Konfigurowanie urządzenia i sprawdzenie jego działania w warunkach laboratoryjnych

Urządzenie SDR przystosowane jest do konfiguracji przy pomocy palmtopa z zainstalowanym oprogramowaniem *DataCollect Com*. Można to również zrobić używając emulatora palmtopa, zainstalowanego na komputerze PC. W obu przypadkach przebieg konfiguracji wygląda tak samo. Należy wykonać następujące czynności:

- Podłączyć urządzenie SDR do komputera za pomocą przewodu komunikacyjnego (port RS232),
- Uruchomić program **PalmOSEmulator**,
- Uruchomić palmtopa (przycisk *Power*), jeśli w danej aplikacji jest to konieczne,
- Wybrać ikonę *Data Collect Com* na ekranie symulatora palmtopa (patrz rys. 2),



Rys. 2. Widok ekranu głównego symulatora.

Po uruchomieniu programu pojawi się ekran przedstawiony na rys. 3



Rys. 3. Widok ekranu umożliwiającego konfigurowanie urządzenia.

PARAMETER – służy do ustawiania parametrów pomiaru,

CLOCK – ustawianie czasu,

GET DATA – pobieranie danych z urządzenia SDR do palmtopa,

CLEAR MEM – czyszczenie pamięci przed kolejną sesją pomiarową,

ONLINE – umożliwia śledzenie bieżących wyników pomiarowych,

STOP – zakończenie komunikacji pomiędzy SDR i palmtopem,

SETUP – ustawianie pomiaru w określonych przedziałach czasowych (w celu oszczędzania baterii),

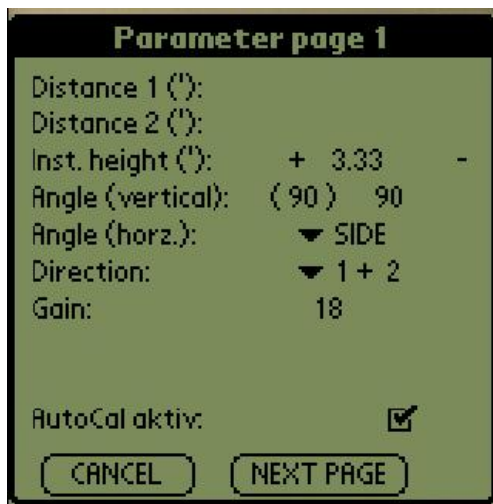
SERVICE – dostępne tylko dla serwisu, zabezpieczone kodem.

- Ustawić w urządzeniu aktualną datę i czas. Wybrać opcję *CLOCK* (pojawi się ekran jak na rys. 4). Urządzenie pobierze datę i czas z komputera (należy zadbać, aby czas i data były ustawione prawidłowo). Należy zwrócić uwagę, że przy tej okazji wymuszone jest usunięcie danych znajdujących się w pamięci urządzenia.



Rys. 4. Ustawianie czasu i daty (skutkujące usunięciem danych z urządzenia).

- Ustawić parametry pomiaru używając opcji *PARAMETER* (patrz rys. 5).



Rys. 5. Ustawienie parametrów pomiaru.

Wymagane jest ustawienie parametrów (odległości i kątów) wynikających ze sposobu umieszczenia (montażu) urządzenia względem drogi.

- W pierwszej kolejności należy w polu *Angle (horz.)* wybierać rodzaj instalacji. Radar może być umieszczony przy jezdni (*SIDE*) lub nad nią (*TOP*),

- Następnie należy określić, które pasy ruchu mają być objęte pomiarem (*Direction*) (numeracja pasów ruchu, patrz [1]),
- W polach *Distance 1* i *Distance 2* wprowadzić odległości czujnika od środków pasów (pasa) ruchu objętych pomiarem (dla warunków laboratoryjnych przyjąć obie wartości równe 2 m),
- W polu *Inst. height* wprowadzić wysokość, na której znajduje się czujnik,
- Na podstawie powyższych danych program obliczy optymalny kąt ustawienia czujnika w pionie (*Angle (vertical)*). Kąt ten należy ustawić, używając dołączonego kątomierza (patrz rys. 6),



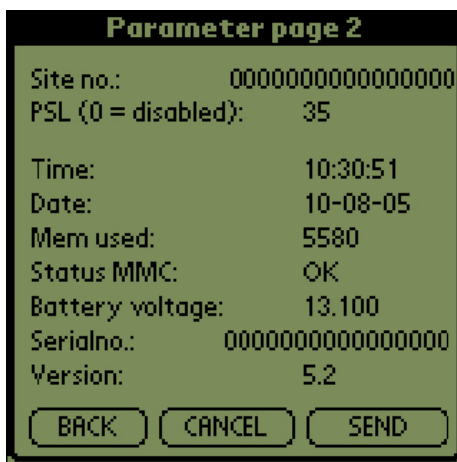
Rys. 6. Ustawienie kąta pochylenia radaru.

- Pole *Gain* służy do ustawienia czułości czujnika. Optymalną wartością jest 18,
 - Opcja *AutoCal activ* aktywuje automatyczną kalibrację czujnika. Pole to należy zostawić zaznaczone.
- Przejść do następnej strony parametrów (patrz rys. 7).
- *Site no.* zawiera 16-bitowe oznaczenie miejsca pomiaru,
 - Pozostałe pola zawierają informacje, takie jak czas, data, stan pamięci, napięcie zasilania, numer seryjny urządzenia i wersja oprogramowania,
 - Pole *PSL (Posted Speed Limit)* służy do ustawienia limitu prędkości. W przypadku jego ustawienia uzyskuje się informacje, które pojazdy przekroczyły ustalony limit. Opcja zostaje wyłączona jeżeli wpisujemy 0.

Kliknięcie przycisku *SEND* powoduje zapisanie ustawień w pamięci urządzenia.

Urządzenie jest gotowe do pracy.

Należy jeszcze usunąć dane, które urządzenie mogło przez przypadek zarejestrować. W tym celu wybieramy *CLEAR MEM* w głównym menu, następnie *CLEAR DATA ON DEVICE*.



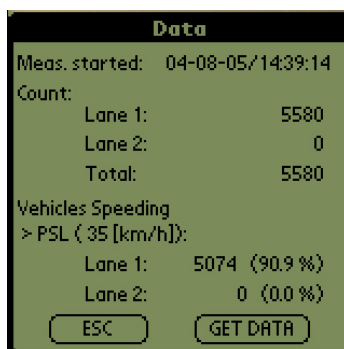
Rys. 7. Ustawienie parametrów pomiaru c.d.

W warunkach laboratoryjnych mierzone obiekty można zasymulować np. arkuszem blachy. Stojąc przed urządzeniem, zbliżać do niego arkusz z różnymi prędkościami. Rejestrowane dane można kontrolować na bieżąco przy pomocy funkcji *ONLINE* dostępnej na ekranie *Data Collect Com* (patrz rys. 3).

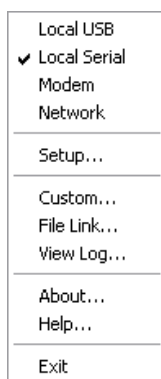
Ad 3. Odczyt danych z urządzenia

Po zakończeniu testów laboratoryjnych należy odczytać dane zarejestrowane w pamięci urządzenia. W celu pobrania danych należy:

- Podłączyć komputer do urządzenia SDR i uruchomić symulator palmtopa,
- Uruchomić aplikację *Data Collect Com*,
- Wybrać opcję *GET DATA* (pojawi się okno z informacjami o zarejestrowanych danych (patrz rys. 8)),
- Skopiować dane do pamięci palmtopa, wybierając przycisk *GET DATA*. Po skopiowaniu dane wciąż znajdują się w pamięci urządzenia radarowego. W celu skasowania danych przed kolejnym pomiarem (jeśli chcemy) należy wybrać *CLEAR MEM*.
- Aby pobrać dane z palmtopa do komputera, na komputerze powinno być zainstalowane odpowiednie oprogramowanie (na pasku zadań powinna znajdować się ikona *HotSync*). Klikając na nią prawym przyciskiem myszy, dokonujemy ustawień połączenia z palmtopem (rys. 9):
 - **Połączenie, z którego korzysta palmtop ustawić *network*,**
 - W menu *Custom* ustawić opcję *DataCollect Data Transfer* na *Handheld overwrites desktop*,

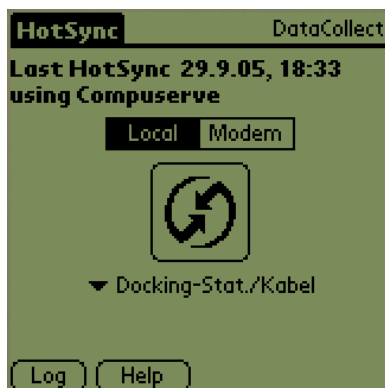


Rys. 8. Informacje o zarejestrowanych pojazdach.




Rys. 9. Opcje ustawienia połączenia z palmtopem.

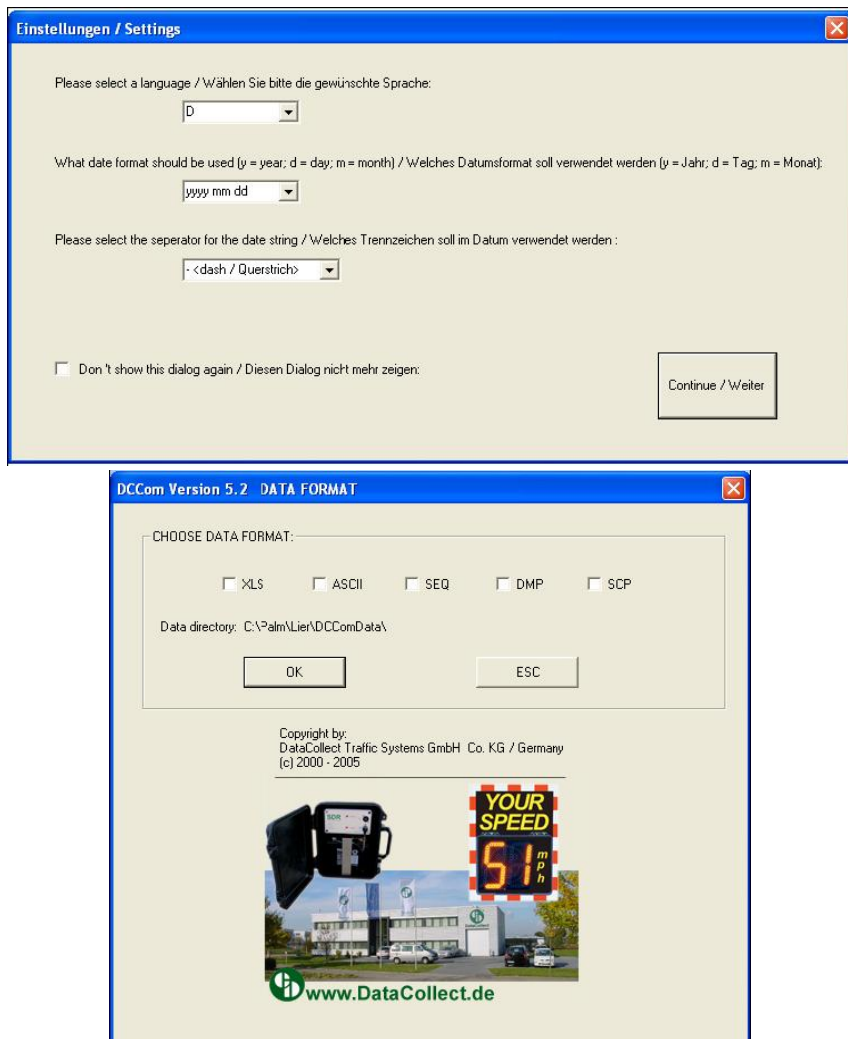
- W symulatorze palmtopa wybrać ikonę *HotSync*. Na ekranie pojawi się okno jak na rys. 10.



Rys. 10. Okno przy pobieraniu danych z palmtopa do komputera PC.

- Wybrać ikonę .

- Pojawiają się okna jak na rys. 11, pozwalające na wybór języka i formatu danych.



Rys. 11. Okna wyboru języka i formatu danych.

- Wybrać przycisk *OK* w celu zapisu danych we wskazanej lokalizacji.

Ad 4. Konfigurowanie i praca urządzenia w warunkach terenowych

Przygotować urządzenie do pracy w warunkach terenowych:

- Skonfigurować parametry urządzenia zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w punkcie 2.
- Urządzenie przygotować do pracy na poboczu jezdni jednokierunkowej.

- Lokalizacja, plan sytuacyjny punktu pomiarowego, wymiary i odległości zostaną podane przez prowadzącego.
- Po zakończeniu działań konfiguracyjnych wyczyścić pamięć urządzenia i wyłączyć go.
- Ustawić urządzenie na stanowisku terenowym (pamiętać o kamizelkach odblaskowych).
- Włączyć urządzenie i przeprowadzić pomiary (w trakcie pomiarów starać się zapisywać klasę kolejno przejeżdżających pojazdów, w celu późniejszej weryfikacji poprawności przeprowadzonych pomiarów).
- Po zakończeniu pomiarów (0.5-1 godziny) urządzenie wyłączyć i przenieść do laboratorium.
- Odczytać i zapisać dane na dysku (najlepiej w formacie Excela).

Ad 5. Analiza zebranych danych pomiarowych

Posiadając dane w formacie Excela, przygotować raporty z pomiarów, wyznaczając podstawowe parametry ruchu: rozkład liczby pojazdów w czasie, podział na klasy pojazdów i rozkłady klas, rozkład prędkości pojazdów w czasie, histogramy prędkości i długości pojazdów itp.

Ad 6. Weryfikacja dokładności pomiaru prędkości i klasyfikacji pojazdów

Na podstawie zarejestrowanych danych i notatek sporządzonych w czasie pomiarów, zweryfikować dokładność pomiaru długości pojazdów.

Posiadając inną, bardziej wiarygodną metodę pomiaru prędkości można również podjąć próbę weryfikacji dokładności pomiaru prędkości przez urządzenie radarowe SDR (Punkt możliwy do realizacji na terenowym stanowisku pomiarowym wyposażonym w czujniki nacisku).

Wykaz aparatury

1. Urządzenie radarowe SDR z akumulatorem i przewodem zasilającym,
2. Statyw,
3. Uchwyty do mocowania urządzenia,
4. Kątomierz,
5. Przewód do komunikacji z komputerem,
6. Komputer z oprogramowaniem lub palmtop,
7. Ładowarka do akumulatora.

Ćwiczenie 2

Czujnik laserowy w pomiarach parametrów pojazdów

Celem tego ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania czujnika laserowego oraz sprawdzenie jego możliwości pomiarowych w zastosowaniu do pomiaru parametrów pojazdów oraz ograniczeń wynikających z zastosowanych w mierniku rozwiązań technicznych i programowych.

Program ćwiczenia

1. Wstęp.
2. Przygotowanie stanowiska pomiarowego.
3. Konfiguracja portu.
4. Zapoznanie się z podstawowymi funkcjami aplikacji obsługującej czujnik.
5. Wykonywanie pojedynczych pomiarów.
6. Pomiary z uśrednianiem.
7. Pomiary z wyzwaniem programowym i sprzętowym.
8. Rejestracja profili pojazdów.

Zakres wymaganych wiadomości

Zasady działania laserów, podstawowe parametry opisujące pojazd i metody ich pomiarów. Podstawowe informacje o interfejsie RS 232.

Literatura

- [1] Distance sensor CM2-30/CMP2-30, Technical Manual, Noptel 2005
- [2] Materiały dostępne na stronie: www.noptel.fi
- [3] M. Tracz, S. Datka, W. Suchorzewski. *Inżynieria ruchu*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2009.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

Czujniki laserowe stosowane są przede wszystkim, do dokładnych pomiarów prędkości, detekcji pojazdów, a także do rejestracji profili geometrycznych samochodów,

a dane zebrane podczas tego typu pomiarów umożliwiają oszacowanie natężenia ruchu oraz klasyfikację samochodów ze względu na ich sylwetkę [3]. Laserowe mierniki mogą pracować jako jednostki samodzielne dokonując ww. pomiarów lub jako elementy rozbudowanych systemów pomiarowych, gdzie pełnią dodatkową funkcję detektorów wyzwalających inne urządzenia pomiarowe. Systemy, wykorzystujące czujniki laserowe, mogą z powodzeniem zastąpić człowieka podczas zliczania pojazdów i ich klasyfikacji.

Urządzenia laserowe stosowane podczas pomiarów drogowych są odporne na szkodliwe warunki atmosferyczne, takie jak duże wahania temperatury, opady, wilgoć. Mają małe wymiary i najczęściej posiadają zwartą budowę oraz możliwość prostego montażu na stanowisku pomiarowym. Widok urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



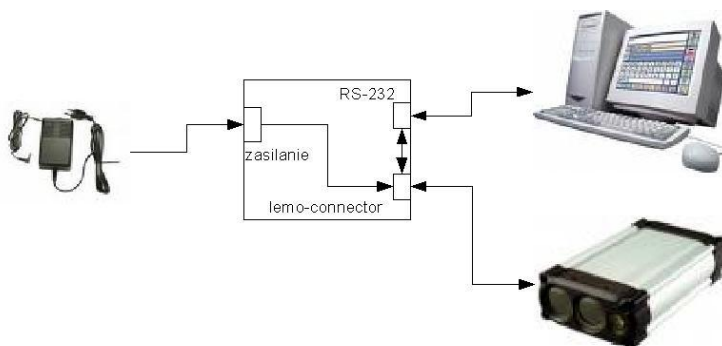
Rys. 1. Czujnik laserowy CM2 - 30.

Urządzenie pozwala na wykonywanie pomiarów odległości w zakresie od 2 do 30 m (dla obiektów o małym współczynniku odbicia). Jeżeli współczynnik odbicia jest duży, zasięg wzrasta dwu lub trzykrotnie, a przy zastosowaniu retroreflektorów można uzyskać dokładny odczyt nawet do 380 m. Model CM2-30 posiada poziomą, prostokątną wiązkę lasera o kącie rozbieżności 1.9×0.7 mrad (wiązka lasera zwiększa wymiary o 1.9×0.7 mm na każdy metr), co w efekcie na odległości 30 m daje wiązkę o wymiarach 60×20 mm. Czujnik łączony jest z systemem pomiarowym przez interfejs szeregowy RS-232, posiada wyjście analogowe oraz cyfrowe wejście i wyjście wyzwalające.

Zasada działania czujnika opiera się na technologii *time-of-flight*. Polega ona na mierzeniu czasu przebiegu "paczki" impulsów sygnału pomiędzy nadajnikiem, obiektem i odbiornikiem. Odległość jest wyznaczona na podstawie znajomości prędkości rozchodzenia się fali świetlnej w powietrzu oraz zmierzonego czasu. Technika ta umożliwia bardzo szybkie pomiary, z częstotliwością dochodzącą do 6 kHz. Czujnik posiada wbudowany celownik optyczny. Wiązka wskaźnika wskazuje tylko orientacyjny punkt pomiaru odległości.

Ad 2. Przygotowanie stanowiska pomiarowego

Połączyć czujnik z komputerem i zasilaczem według schematu przedstawionego na rysunku 2, wykorzystując do tego celu moduł przejściowy.



Rys. 2. Sposób zestawienia stanowiska pomiarowego z czujnikiem laserowym.

Do poprawnej pracy czujnik wymaga napięcia zasilającego o wartości 12V. Najpierw należy załączyć zasilacz, dopiero potem przełącznik znajdujący się na module przejściowym. Jeśli zasilacz został dołączony poprawnie, załączenie wyłącznika na module przejściowym spowoduje zapalenie się zielonej diody na tym module, a czujnik powinien zgłosić gotowość do pracy poprzez chwilowe zaświecenie wskaźnika.

Ad 3. Konfiguracja portu

Czujnik jest obsługiwany przez aplikację *Sensor* napisaną w środowisku LabView. Po włączeniu komputera i uruchomieniu aplikacji *sensor.exe* należy wybrać automatyczną konfigurację portu. Funkcja ta odnajduje port, do którego dołączone jest urządzenie oraz prędkość transmisji odpowiednią do komunikacji z nim. W przypadku gdy port oraz prędkość są znane można skorzystać z opcji ustawienia ręcznego. Jeżeli podczas wyszukiwania urządzenia nastąpi jakiś błąd lub urządzenie nie zostanie odnalezione, pojawi się odpowiedni komunikat. W takim przypadku należy sprawdzić połączenia i powtórzyć konfigurację portu.

Ad 4. Zapoznanie się z podstawowymi funkcjami aplikacji obsługującej czujnik

Zakładka *Terminal* umożliwia podgląd danych przesyłanych łączem szeregowym oraz wysyłanie rozkazów sterujących czujnikiem. Pole wyboru umieszczone nad terminalem decyduje o tym, czy jest on aktywny.

Zakładka *Mode configuration* służy do konfiguracji i aktywacji różnych trybów pracy urządzenia. Dla ułatwienia ustawiania trybów, w tabeli pojawiają się tylko parametry związane z wybranym trybem.

W zakładce *Parameters* istnieje możliwość zmiany wszystkich edytowalnych parametrów oraz zapisanie ich do pliku bądź pamięci podręcznej lub trwałej urządzenia.

W zakładce *Charts* mamy możliwość podglądania graficznej prezentacji wykonywanych pomiarów oraz, po aktywacji, zarejestrowanych profili pojazdów.

Zakładka **Settings** służy do zmian ustawień programu. Przyciski znajdujące na dole okna programu spełniają następujące funkcje:

- **pointer** - służy do włączania i wyłączania wskaźnika laserowego w urządzeniu,
- **echo** - umożliwia podgląd wysyłanych do urządzenia rozkazów,
- **single** - przesyła rozkaz *c* odpowiedzialny za pojedynczy pomiar,
- **continual** - przesyła rozkaz *C* odpowiedzialny za pomiar ciągły,
- **mode** - przesyła rozkaz *M*, który aktywuje tryb pracy zdefiniowany w parametrze 1,
- **cancel** - wysyła znak *ESC* (ASCII 27), co powoduje przerwanie aktualnego trybu pracy czujnika i powrót do trybu podstawowego,
- **finish** - wyłącza podprogram, aplikacja powraca do głównego okna programu.

Ad 5. Wykonywanie pojedynczych pomiarów

Tryb ten można wykorzystać do sprawdzenia dokładności pomiaru odległości obiektu od czujnika w zależności od koloru powierzchni obiektu, jej gładkości oraz faktury. W tym celu należy dokonać serii pomiarów tej samej odległości (dla tego samego obiektu), stosując pomiar pojedynczy (przycisk **single**). Dla obiektów o dużej gładkości i dużym współczynniku odbicia (np. lustro) należy także zbadać wpływ kąta nachylenia na wynik pomiaru. Sprawdzić również wyniki pomiaru dla przezroczystego szkła (odpowiednik szyb w samochodzie). W celu poprawnego przeprowadzenia pomiaru czujnik powinien pracować w trybie podstawowym, a wartości parametrów powinny wynosić:

- par. 1. = 0,
- bit 2. par. 2. = 0,
- bit 2. par. 3. = 1,
- bit 3. par. 3. = 0,
- par. 5./6. = 6000,
- par. 7. = 1.

Ad 6. Pomiary z uśrednianiem

Urządzenie posiada możliwość przesłania wartości uśrednionej, ze zdefiniowanej przez użytkownika liczby pomiarów wykonanych przez urządzenie. Aby sprawdzić jaki wpływ na dokładność i prędkość wykonywania pomiarów ma proces uśredniania, należy dokonać serii pojedynczych pomiarów zmieniając parametr 7. Zalecane ustawienia parametrów:

- par. 1. = 0,
- bit 2. par. 2. = 0,
- bit 2. par. 3. = 1,
- bit 3. par. 3. = 0,
- par. 5./6. = 6000,
- par. 7. należy zmieniać obserwując wpływ uśredniania.

Pomiary wykonywać na obiekcie, dla którego przy pomiarach pojedynczych uzyskiwano największe rozrzuty mierzonej odległości.

Ad 7. Pomiary z wyzwaniem programowym i sprzętowym

Badany czujnik posiada funkcję wyzwania sprzętowego i programowego. Podczas pracy w każdym z tych trybów, dane są wysyłane przez urządzenie w formacie binarnym. Wyniki pomiarów są przesyłane tak długo, jak długo aktywny jest sygnał wyzwolenia. Aby zaobserwować działanie czujnika w trybie wyzwania sprzętowego (możliwość aktywowania czujnika laserowego przez zewnętrzne urządzenie) należy ustawić następujące parametry:

- par. 1. = 3,
- bit 3. par 3. = 0,
- bit 6. par. 3. = 0,
- bit 7. par. 3. = 0,
- par. 5./6. = 2000.

Aby aktywować wejście wyzwania należy wymusić na nim stan niski. W tym celu wystarczy zewrzeć wejście wyzwania z masą czujnika (przyciśnięcie przycisku wyzwania zewnętrznego dołączonego do modułu przejściowego).

Aby zaobserwować sposób działania urządzenia w trybie wyzwania programowego należy ustawić następujące parametry:

- par. 1. = 4,
- bit 3. par 3. = 0,
- bit 6. par. 3. = 0,
- bit 7. par. 3. = 0,
- par. 5./6. = 2000.

Aby wyzwolić urządzenie poprzez linię łącza szeregowego należy użyć przycisku **trig on**, aby dezaktywować programowy trigger należy wcisnąć przycisk **trig off**. Po ustawieniu odpowiednich parametrów, analizowany tryb pracy aktywujemy przyciskiem **mode**.

Ad 8. Rejestracja profili pojazdów

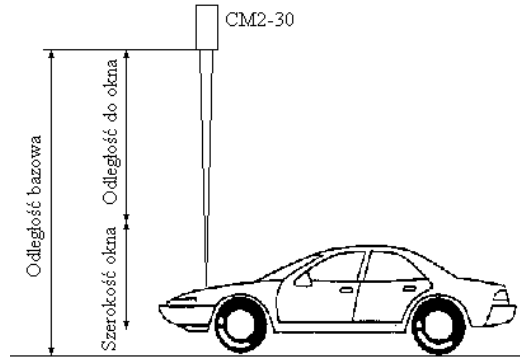
Pomiar profilu polega na dokonaniu serii pomiarów odległości czujnikiem zawieszonym nad drogą. Pomiar powinien rozpocząć się w chwili, gdy przedni zderzak pojazdu znajduje się bezpośrednio pod czujnikiem. Jakość wyznaczenia profilu zależy będzie od liczby pomiarów wykonanych, gdy pojazd znajduje się pod czujnikiem. Mają na to wpływ dwa czynniki: częstotliwość wykonywania pomiarów oraz prędkość z jaką porusza się pojazd. Dane uzyskane w ten sposób mogą służyć do klasyfikacji pojazdu (dobrze jest jeśli dodatkowo znana jest jego prędkość). Zakłada się przy tym, że w trakcie pomiaru pojazd będzie poruszał się cały czas w przybliżeniu z taką samą prędkością. Na podstawie profilu pojazdu uzyskanego bez pomiaru prędkości, nie można uzyskać informacji o jego długości.

Proces rejestracji profilu należy przeprowadzić w trybie wyzwania oknem. Ideę pomiaru profilu przedstawia rysunek 3.

Aby odpowiednio skonfigurować okno wyzwania najpierw należy zmierzyć odległość od czujnika do powierzchni, po której porusza się obiekt (odległość bazowa).

Następnie ustawić szerokość okna (par. 14) tak, aby objęła wysokość obiektu. Po odjęciu od odległości bazowej szerokości okna, otrzymujemy przybliżoną minimalną odległość wyzwania (na rysunku 3 nazwaną odległością od okna i definiowaną przez par.

12/13). Należy jednak zwrócić uwagę, aby suma szerokości okna i minimalnej odległości od okna była nieco (kilka centymetrów) mniejsza od odległości bazowej (patrz rysunek 3). Niedopełnienie tego warunku może powodować błędne wyzwalanie pomiaru, gdy nawierzchnia drogi zostanie uznana za obiekt pomiarowy.



Rys. 3. Idea pomiaru profilu pojazdu.

Tryb pomiaru profilu należy włączyć za pomocą przycisku **mode**. Zalecane jest także włączenie w zakładce **settings** wykresu profilu. Parametr 19. definiuje liczbę próbek, które czujnik ma zebrać po wejściu obiektu w okno (nastawiona wartość parametru pomnożona przez 100 daje liczbę żądanych próbek). Jeżeli parametr 19. ma ustawioną wartość 0, urządzenie będzie wykonywało pomiary, póki obiekt nie opuści okna. Parametry związane z tym trybem powinny być zdefiniowane następująco:

- par. 1. =5,
- bit 0. par. 2. = 1,
- bit 1. par. 2. = 0,
- par. 5./6. = 6000,
- par. 12./13. = według rys. 3. i powyższego opisu,
- par. 14. = według rys. 3. i powyższego opisu,
- par. 19. = według powyższego opisu,
- bit 6. par. 26. = 1,
- par. 29./30. = 3000.

Uzyskane wyniki pomiaru profili, dla różnych modeli pojazdów, zapisać do pliku w celu późniejszej ich analizy (np. klasyfikacji pojazdów).

Wykaz aparatury

1. Komputer z odpowiednim oprogramowaniem,
2. Miernik laserowy CM2-30,
3. Zasilacz,
4. Moduł przejściowy,
6. Obiekty pomiarowe.

Ćwiczenie 3

Czujniki magnetyczne w pomiarach parametrów ruchu drogowego

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zaawansowanymi możliwościami pomiarowymi czujnika magnetycznego NC-200 firmy Quixote Transportation Technologies. Zadaniem jest zaprogramowanie czujnika, przeprowadzenie pomiarów, odczyt oraz analiza wyników pomiarowych.

Program ćwiczenia

1. Zasada działania, budowa i parametry czujnika magnetycznego NC-200.
2. Przygotowanie czujnika do pracy.
3. Konfigurowanie czujnika.
 - a) Ustawienia wstępne.
 - b) Ustawienia parametrów pomiaru.
4. Odczyt danych z czujnika.
5. Analiza danych pomiarowych i opracowanie raportu.

Zakres wymaganych wiadomości

Czujniki magnetyczne, budowa, zasada działania, podstawowe parametry. Wykorzystanie czujników magnetycznych w pomiarach parametrów ruchu drogowego. Podstawowe parametry opisujące ruchu drogowy i parametry opisujące pojedynczy pojazd będący w ruchu.

Literatura

- [1] QQT, *HDM 9.0.30 Operations and User Manual*.
- [2] QQT, Strona www produktu, <http://www.qttinc.com/pages/nc200.html>.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zasada działania, budowa i parametry czujnika magnetycznego NC-200

NC-200 jest czujnikiem pola magnetycznego (magnetometr), działającym na zasadzie wykrywania anomalii w polu magnetycznym Ziemi, które wywołują przejeżdżające pojazdy (patrz rysunek1). Do detekcji pojazdów wykorzystuje magnetyczny obraz pojazdu,

Ćw. 3. – Czujniki magnetyczne w pomiarach parametrów ruchu drogowego

wynikający z wpływu metalowych części obiektu, które interferują z polem magnetycznym Ziemi. W efekcie wytwarzany jest sygnał elektryczny.



Rys. 1. Zmiana pola magnetycznego Ziemi wywołana przez przejeżdżający pojazd.

Czujnik posiada aluminiową obudowę i instalowany jest na nawierzchni jezdni. Do zamontowania czujnika służy specjalna gumowa pokrywa mająca za zadanie ochronę czujnika przed uszkodzeniami mechanicznymi (patrz rysunek 2). Przy montażu należy zwrócić uwagę na położenie czujnika względem kierunku ruchu na danym pasie drogi.



Rys. 2. Czujnik NC-200 z osłoną na terenowym stanowisku pomiarowym.

Wykorzystuje się go do wykrywania obecności pojazdów i ich zliczania, pomiaru prędkości, a także długości każdego przejeżdżającego pojazdu, mierzenia natężenia ruchu. Mierzy on również temperaturę nawierzchni. Czujnik magnetyczny może być alternatywą dla pętli indukcyjnej, zwłaszcza w miejscach, gdzie montaż pętli jest niemożliwy. Wadą tych detektorów jest stosunkowo mała strefa detekcji. Po zamontowaniu czujnik musi mieć czas na autokalibrację tzn. na dostosowanie się do natężenia pola magnetycznego w punkcie pomiarowym oraz wniesienie poprawek mających na celu zminimalizowanie wpływu wszelkich elementów metalowych znajdujących się w pobliżu czujnika. Powinien być montowany centralnie na pasie jezdni (pojazdy powinny przejeżdżać ponad czujnikiem). Ma to też na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa najechania pojazdu na czujnik. Nie powinien być montowany np. na mostach (most jest konstrukcją żelbetonową

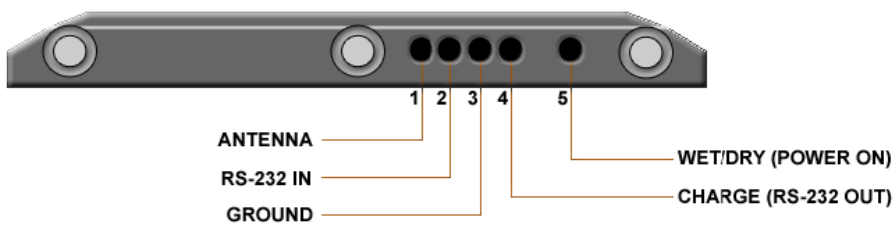
co uniemożliwia poprawną kalibrację czujnika). Sposób jego zasilania powoduje, że nie nadaje się on do długotrwałych ciągłych pomiarów.

Podstawowe parametry czujnika:

- Sensor: chip magnetyczny GMR,
- Praca w temp.: -20 °C do +60 °C,
- Pamięć: 3 MB (Micro Serial Flash),
- Pojemność danych: do 300000 pojazdów lub do 21 godzin pracy,
- Zasilanie bateria litowo-jonowa (21 dni pracy),
- Stosowane jednostki miar: metryczne lub imperialne,
- Klasyfikacja ze względu na prędkość, można zadawać 13 przedziałów,
- Klasyfikacja ze względu na długość: 15 przedziałów konfigurowanych przez użytkownika,
- Zakres detekcji: wykrywa pojazdy poruszające się z prędkością od 13 do 193 km/h,
- Waga: 0.59 kg.

Ad 2. Przygotowanie czujnika do pracy

Przed przystąpieniem do pracy z czujnikiem, należy upewnić się, że bateria wewnętrzna jest w pełni naładowana. Jeśli konieczne jest doładowanie, proces ten rozpoczyna się od podłączenia 5-cio stykowej wtyczki ładowarki do złącza umieszczonego na krawędzi czujnika (patrz rysunek 3).



Rys. 3. Złącze czujnika NC-200.

Ładowarkę należy dołączyć do zasilacza o stabilizowanym napięciu 5 V. Ładowanie jest sygnalizowane przez zapalenie czerwonej diody w ładowarce. Pełne ładowanie czujnika trwa około 12 godzin. Zapalenie zielonej diody oznacza, że czujnik jest w pełni naładowany. Po zakończeniu ładowania i wyłączeniu zasilacza, ładowarka musi zostać odłączona od czujnika (pozostawienie ładowarki w gnieździe czujnika może doprowadzić do jego rozładowania). Proces ładowania kasuje ustawienia konfiguracji czujnika zapisane podczas jego programowania, nie usuwa natomiast wyników pomiarów zgromadzonych w czujniku.

Kolejnym etapem jest połączenie czujnika z komputerem poprzez interfejs RS 232. Do tego celu służy specjalny przewód zakończony z jednej strony wtyczką dołączaną do portu RS232 komputera, a z drugiej strony interfejsem dołączanym do 5-cio stykowego złącza w czujniku (patrz rysunek 3). Wtyczka z interfejsem posiada 2 diody informujące

o transmisji danych z (zielona) i do (czerwona) czujnika. W przypadku braku portu szeregowego w komputerze, można wykorzystać adapter typu USB - RS232.

Ad 3. Konfigurowanie czujnika

Do ustawienia parametrów pomiarów, programowania czujnika, odczytu oraz analizy danych pomiarowych służy oprogramowanie HDM (z *ang.* Highway Data Management) dostarczone wraz z czujnikiem. Umożliwia ono:

- programowanie czujnika,
- odczytywanie wykonanych przez czujnik pomiarów,
- tworzenie raportów,
- sprawdzenie stanu baterii.
- archiwizację danych pomiarowych na dysku komputera.

a) Ustawienia wstępne

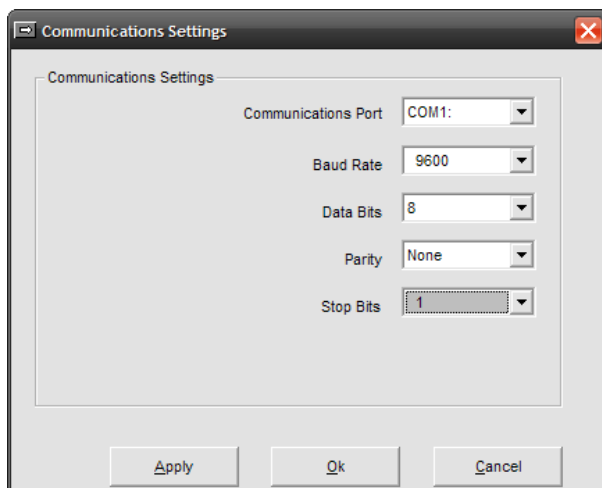
Przewód interfejsu dołączyć do gniazda komputera, ale nie dołączać do czujnika (w odpowiednim momencie pojawi się komunikat zezwalający na dołączenie czujnika). Przy pierwszym uruchomieniu programu, należy go skonfigurować. Konfiguracja dotyczy ustawień portu szeregowego (komunikacja z czujnikiem przebiega sprawnie na domyślnych ustawieniach portu), ustawień lokalizacji, używanych jednostek, formatu daty i czasu. Można zmienić również parametry dotyczące programowania czujnika: maksymalny czas oczekiwania na rozpoczęcie pomiaru, minimalny odstęp czasu pomiędzy zaprogramowaniem czujnika, a rozpoczęciem pomiaru, czy zliczanie pojazdów jadących w przeciwnym kierunku.

Aby skonfigurować port, do którego został dołączony interfejs należy wybrać z menu funkcję *File* → *Properties* → *Communications*, a następnie ustawić:

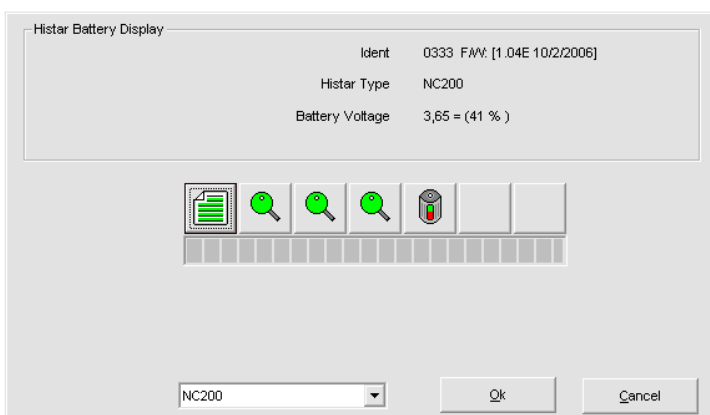
- numer portu: wybieramy numer portu, do którego podłączony jest czujnik,
- szybkość transmisji: szybkość może być ustawiona w zakresie 300 ÷ 230400 bps. Pozwala to na dostosowanie szybkości transmisji do możliwości sprzętu,
- długość ramki: liczba bitów danych w ramce: od 5 do 8,
- parzystość: kontrola parzystości jest formą ochrony przesyłanych danych przed zakłóceniami,
- bit stopu: użytkownik może wybrać: 1, 1.5 lub 2 bity stopu.

Okno ustawień parametrów transmisji oraz ustawienia domyślne przedstawiono na rysunku 4.

Kolejnym krokiem jest sprawdzenie stanu baterii. W tym celu wybieramy z menu opcję *Histar* → *Voltage* (patrz rysunek 5). W tym oknie należy wybrać model czujnika (NC-200). Następnie pojawi się komunikat sugerujący dołączenie interfejsu do czujnika. Jeśli planowane jest przeprowadzenie długoterminowych pomiarów, to nie należy programować urządzenia, gdy napięcie na baterii ma wartość poniżej 3.7 V. Jeśli w trakcie pomiarów napięcie baterii spadnie do ok. 3.4 V, pomiar zostaje przerwany, a wyniki zebrane do tego momentu będą bezpiecznie przechowane w pamięci czujnika.



Rys. 4. Okno ustawień parametrów transmisji.



Rys. 5. Okno kontroli stanu baterii.

b) Ustawienia parametrów pomiaru

Aby przygotować czujnik do pomiaru wybieramy z menu funkcję *Histar* → *Program*. Podczas programowania czujnika, następuje automatyczne zsynchronizowanie czasu czujnika z czasem ustawionym w komputerze (należy zadbać, aby czas w komputerze był ustawiony poprawnie).

Po wybraniu funkcji *Program* pojawi się okno ustawień (patrz rysunek 6). Należy zwrócić uwagę na jednostki, w których będą podawane wyniki pomiarów. Sygnalizowane jest to na belce okna jako: **Imperial** lub **Metric**. W celu ewentualnej zmiany tego ustawienia należy wybrać *File* → *Properties* → *Program Options* i ustawić właściwą jednostkę.

The screenshot shows the 'HI-Star Setup [Metric]' window with the following configuration:

- Study Start and End Dates:** Start Study on: piątek 07-20-2007, At 09 (AM) 45. End Study on: piątek 07-20-2007 01:45 PM.
- Study Duration:** 00 Days, 04 Hours, 00 Minutes. Data Period: 15.
- Roadway Location Information:** State: PA, City: Krakow, County: Polska, Street: Reymonta, Lane: Driving, Speed: 55, Operator: AGH.
- Speed Bins [Km/h]:**

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
<	32,0	48,0	64,0	80,0	97,0	113,0	129,0								
31,9	47,9	63,9	79,9	96,9	112,9	128,9	>								
- Length Bins [Meters]:**

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
<	3,7	4,9	6,4												
3,6	4,8	6,3	>												

Rys. 6. Okno ustawień pomiaru.

W tym oknie należy ustawić:

- datę i czas rozpoczęcia pomiaru oraz czas trwania pomiaru (należy pamiętać o minimalnym opóźnieniu startu pomiaru, który wynosi ok. 45 min (15 min – zamontowanie czujnika na drodze oraz **30 min – autokalibracja czujnika**). Data i godzina zakończenia wyliczana jest na podstawie **czasu trwania** pomiaru. Zmienna *Data Period* określa liczbę minut, w których dane są agregowane. Przy planowaniu dłuższych pomiarów należy wybierać dłuższe przedziały czasu (np. 15 minut), ze względu na pojemność pamięci czujnika.
- informacje o lokalizacji terenowego stanowiska pomiarowego. Pole *Speed* powinno być ustawione na wartość prędkości z jaką przeciętnie poruszają się pojazdy w miejscu wykonywania pomiarów (np. obowiązujące tam ograniczenie prędkości).
- przedziały prędkości, do których zaliczane będą kolejne pojazdy w danym interwale czasu (*Data Period*). Maksymalnie można wybrać 16 przedziałów prędkości.

- przedziały długości pojazdów należących do kolejnych klas. Pomimo dostępnych 16 pól, wybrać można tylko 8 przedziałów długości.

Okno to posiada również menu zawierające trzy polecenia: *File*, *NC97 Functions* i *Program*.

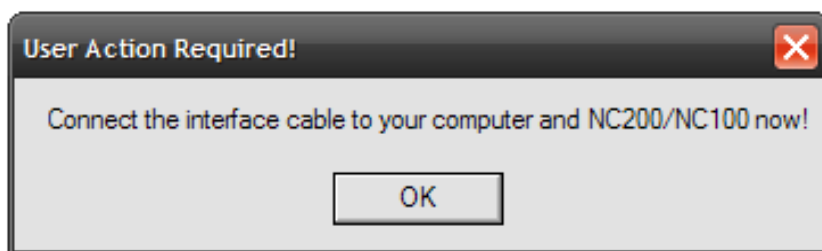
Polecenie *File* umożliwia zapisanie i wczytanie często używanych ustawień. Wszystkie pliki zapisywane lub otwierane muszą posiadać rozszerzenie *.hps* (histor program session).

Polecenie *NC-97 Features* włącza/wyłącza dodatkowe funkcje dostępne w modelach NC-97 i wyższych:

- *Reverse Vehicle Count Enabled* – możliwość zliczania pojazdów poruszających się w przeciwnym kierunku niż poprawny kierunek danego pasa ruchu,
- *Assume Free Flowing Traffic* – spokojny ruch samochodów,
- *Verification Transmitter ON* – nie działa w analizatorach NC-200.

Polecenie *Program* uaktywnia dodatkowe okno wyboru. Należy w nim wybrać właściwy typ czujnika, który aktualnie chcemy zaprogramować. Następnie pojawi się okno zawierające podsumowanie wcześniej wybranych opcji (biała czcionka). Jeśli zauważymy, że wybrane zostały niepoprawne opcje, można je zmienić wybierając przycisk *Cancel*.

Jeśli wszystkie opcje są już wybrane poprawnie można zaprogramować urządzenie. W tym celu wybieramy przycisk *Program*. Wówczas powinien pojawić się komunikat, że należy teraz podłączyć interfejs do czujnika (patrz rysunek 7).



Rys. 7. Okno informujące o konieczności dołączenia interfejsu do czujnika.

Po wybraniu *OK*, ustawione opcje są zapisywane do czujnika (czcionka w oknie podsumowania zmienia się na czarną).

Po poprawnym zaprogramowaniu czujnika, **należy w ciągu 30 sekund** odłączyć wtyczkę interfejsu od czujnika.

Przed zamontowaniem czujnika na stanowisku terenowym, należy najpierw zaprogramować go na bardzo krótki czas pomiarów (np. 5 minut). Nie odczekując 30 minut, w warunkach laboratoryjnych pobudzać czujnik metalowym obiektem (blacha) we wskazanym kierunku jazdy pojazdów. Następnie odczytać z czujnika zebrane dane (patrz punkt 4). Poprawne odczytanie danych świadczy o poprawności działania czujnika.

Następnie należy ponownie zaprogramować urządzenie i zainstalować je na terenowym stanowisku pomiarowym, pamiętając, że **musi ono znaleźć się na drodze**

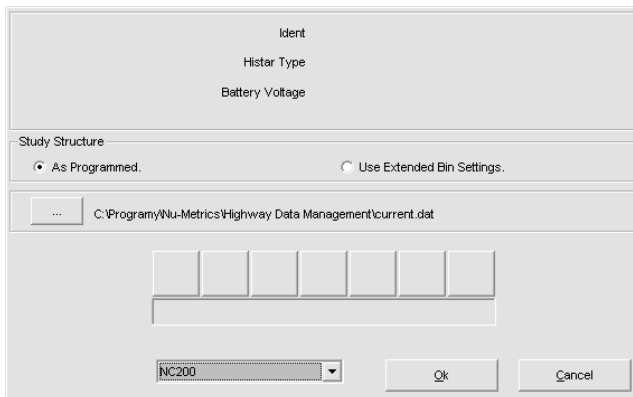
przynajmniej na 30 minut przed zaprogramowanym czasem rozpoczęcia przez nie pomiarów.

Ad 4. Odczyt danych z czujnika

Po zakończeniu pomiarów i zdemontowaniu czujnika ze stanowiska pomiarowego można odczytać zebrane dane. Wcześniej jednak należy doładować baterię w czujniku. Jeśli napięcie baterii byłoby zbyt niskie odczyt danych może zakończyć się niepowodzeniem.

Należy uruchomić oprogramowanie i przed odczytem danych należy wybrać ścieżkę do ich zapisu. Wiąże się to utworzeniem lub otwarciem pliku *.mdb*. Można to zrobić klikając prawym przyciskiem myszki na dodaną ścieżkę i wybierając opcję *Set As Destination*. Jeśli nie wykonamy takiej operacji program nie będzie wiedział gdzie ma zapisać wyniki pomiaru i zakomunikuje to odpowiednim monitem.

Po wybraniu z menu polecenia *Read* pojawi się okno odczytu (patrz rysunek 8).



Rys. 8. Okno odczytu danych.

Należy wybrać używany model czujnika (w tym przypadku NC-200) i zatwierdzić. Aplikacja powiadomi o potrzebie dołączenia interfejsu do czujnika (okno jak na rysunku 7).

Po dołączeniu interfejsu i zatwierdzeniu tej operacji rozpocznie się nawiązywanie komunikacji z czujnikiem. Następuje sprawdzanie numeru identyfikacyjnego, typu urządzenia i stanu baterii (co uwidaczniane jest w oknie odczytu danych). Jeśli wszystkie informacje są poprawne, wyniki pomiarów zostaną zapisane na dysku. Po zakońzonej transmisji pojawi się informacja, że wyniki pomiarów dodano do katalogu. Aby zakończyć odczyt wybrać polecenie *Cancel* i odłączyć interfejs od czujnika.

Ad 5. Analiza danych pomiarowych i opracowanie raportu

Wyniki pomiarów mogą być analizowane tuż po odczycie z czujnika lub po wczytaniu z dysku (danych wcześniej zapisanych).

Wybierając z Menu: *Utilities* → *View Current.dat* możemy sprawdzić zawartość pliku *Current.dat*. Nazwa pliku ma dosłowne znaczenie. Są to dane aktualnie odczytane z czujnika. Jest to pośredni plik tekstowy utworzony jako plik programu HDM. Są one szczególnie przydatne, jeśli istnieją jakiegokolwiek wątpliwości co do jakości uzyskanych wyników pomiarowych. Do tego celu służy również możliwość podglądu pliku *Program.dat* (*Utilities* → *View Program.dat*). W pliku tym zawarte są informacje/ustawienia użyte do zaprogramowania czujnika.

W celu przygotowania raportu z pomiarów należy kliknąć prawym klawiszem myszy w lewym oknie programu HDM i wybrać opcję *Add Catalog to List* lub założyć nowy katalog z danymi. Po wczytaniu istniejącego katalogu, kliknąć na jego nazwie w celu wyświetlenia jego zawartości w prawym oknie. Z prawego okna należy wybrać dane do analizy i dwukrotnie kliknąć na wybranej nazwie. Program przejdzie do opcji tworzenia raportów. Można wyświetlić dowolną liczbę okien z raportami z różnych pomiarów lub tego samego pomiaru. Każde okno raportu posiada dane lokalizacyjne pomiaru oraz czas rozpoczęcia i końca pomiaru, co pozwala na szybkie zidentyfikowanie oglądanego raportu. Dzięki menu *Reports* i *Graph* możemy wyświetlić wyniki pomiaru w postaci różnych raportów liczbowych lub w postaci graficznej.

W oparciu o dane zebrane w czasie wykonywania ćwiczenia sporządzić raport zarówno tekstowy jak i raport w postaci graficznej. Wybrać takie przekroje danych, które będą najlepiej charakteryzowały warunki ruchu drogowego w punkcie pomiarowym.

Możliwe jest również wygenerowanie raportu sumarycznego zawierającego wszystkie możliwe do pokazania w programie charakterystyki.

W sprawozdaniu należy skomentować uzyskane wyniki.

Wykaz aparatury

1. Czujnik magnetyczny NC-200 wraz z osprzętem,
2. Komputer z odpowiednim oprogramowaniem,
3. Zasilacz.

Ćwiczenie 4

Pomiary parametrów pojazdów z wykorzystaniem systemu Raktel-8000

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z komercyjnym systemem do pomiaru parametrów ruchu drogowego Raktel-8000. Student pozna możliwości udostępniane przez sprzęt i oprogramowanie, poprzez samodzielne skonfigurowanie sprzętu i dokonanie pomiarów diagnostycznych i drogowych przy różnych konfiguracjach czujników indukcyjnych i pojemnościowych.

Program ćwiczenia

1. Wstęp.
2. Zestawienie i połączenie sprzętu.
3. Konfiguracja oprogramowania.
4. Diagnostyka urządzenia i czujników.
5. Pomiary z pojedynczą pętlą indukcyjną.
6. Pomiary w układzie dwupętlowym.
7. Pomiary w układzie dwie pętle i czujnik pojemnościowy.
8. Generowanie raportów.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowe parametry opisujące ruchu drogowy i parametry opisujące pojedynczy pojazd będący w ruchu. Budowa i zasada działania czujników indukcyjnych pętlowych oraz pojemnościowych czujników nacisku.

Literatura

- [1] Notatki z wykładu.
- [2] Materiały pomocnicze dostępne na stronie Katedry Metrologii.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

System Raktel-8000 umożliwia współpracę z różnymi konfiguracjami czujników. Możliwa jest współpraca z pojedynczą pętlą indukcyjną, układem dwóch pętli

indukcyjnych, dwiema pętlami i czujnikiem nacisku: piezoelektrycznym lub pojemnościowym, pojedynczą pętlą i dwoma czujnikami piezoelektrycznymi. Umożliwia on pomiar z kilkoma wymienionymi zestawami równocześnie. Każda z tych konfiguracji pozwala na pomiar innego zestawu parametrów pojazdu będącego w ruchu. System zasadniczo zaprojektowany został do pracy jako datalogger, który odpowiednio zaprogramowany działa samodzielnie rejestrując parametry ruchu drogowego takie jak: czas pojawienia się pojazdu na stanowisku pomiarowym, pas drogi po którym porusza się pojazd, szybkość, profil magnetyczny pojazdu, długość, odległości między osiami pojazdu, nacisk każdej z osi, masa całkowita, klasyfikacja (wg schematu np. FHWA). System umożliwia również przygotowanie raportów. Dane, które zostały zarejestrowane są dostępne dla użytkownika zdalnie poprzez modem lub lokalnie poprzez RS232.

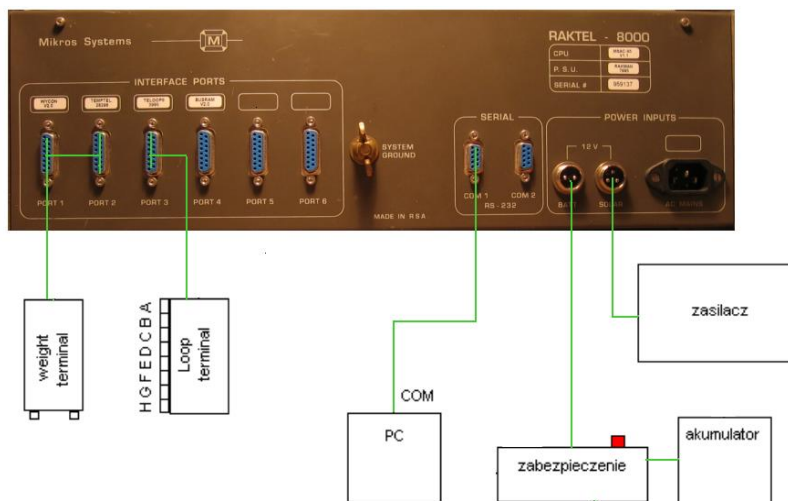
Ad 2. Zestawienie i połączenie sprzętu

Połączyć rejestrator wraz z osprzętem do komputera zgodnie z rysunkiem 1 - panel tylny (bez obwodu akumulatora!).

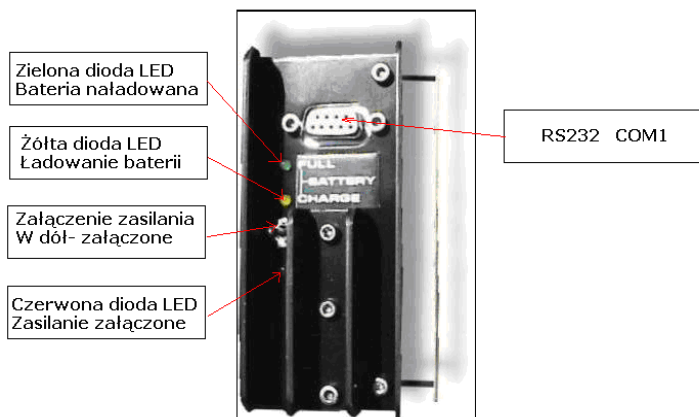
Zwrócić uwagę na prawidłowe podłączenie czujników do terminali oraz na stan diod na rejestratorze po włączeniu zasilania (patrz rys. 2 - panel przedni). Należy zwrócić uwagę na sposób wyłączania dataloggera, gdyż wymaga ono długiego (5s) trzymania przełącznika.

W poprawnie podłączonym urządzeniu (bez akumulatora) wszystkie diody na panelu czołowym powinny być zapalone.

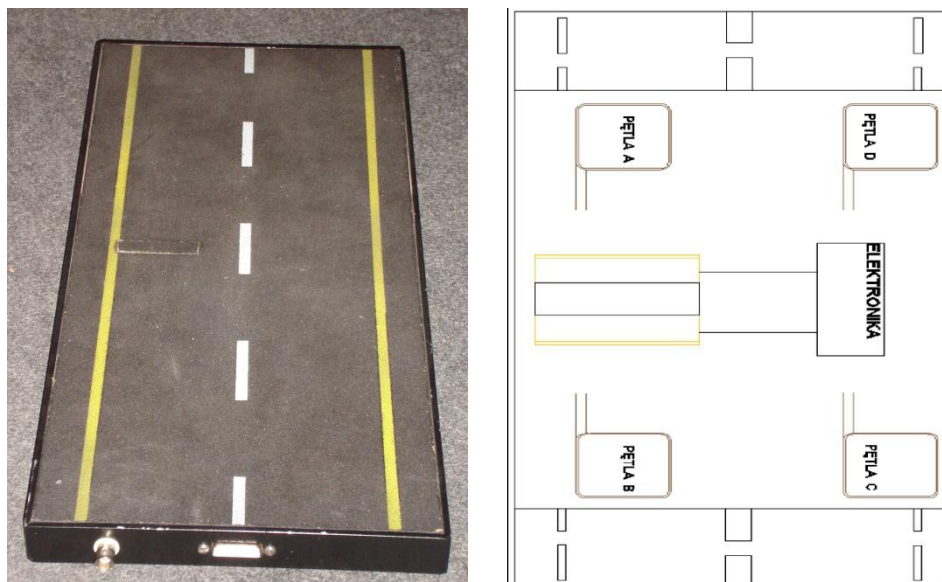
Czujniki zamontowane są w modelu drogi (patrz rysunek 3). Dostępne są dwie pętle indukcyjne na każdym pasie, a na jednym z pasów zamontowany jest dodatkowo pojemnościowy czujnik nacisku



Rys. 1. Ilustracja podłączenia osprzętu do rejestratora Raktel-8000 (tylny panel).



Rys. 2. Fragment przedniego panelu rejestratora.



Rys. 3. Model drogi i rozkład czujników na obu pasach.

Ad 3. Konfiguracja oprogramowania

Włączyć komputer. Uruchomić program *Norton Commander*, a następnie program *TELSYS* znajdujący się w folderze *c:\TELSYS* za pomocą polecenia *tel.exe*.

Sprawdzić poprawność konfiguracji portu komunikacyjnego (patrz: materiały pomocnicze, zakładka **Setup**) wchodząc w **Setup/Comms/Logger/SerialComs**. Po zakończeniu konfiguracji portu wrócić do głównego menu i wybrać polecenie **Comms** w celu uruchomienia modułu **TELCOM**, aby przygotować urządzenie do rejestracji danych.

Podstawą jakichkolwiek pomiarów, jest zbudowanie lub załadowanie odpowiedniej bazy dróg (patrz materiały pomocnicze zakładka **SiteInfo**).

W głównym menu wybrać zakładkę **Logger** i polecenie **ONLine** w celu połączenia się z rejestratorem, a następnie skonfigurować go (polecenie **SetupTEL**).

Ad 4. Diagnostyka urządzenia i czujników

Diagnostyka jest bardzo pożądaną funkcją każdego systemu pomiarowego. **TELCOM** umożliwia przeprowadzenie testu poprawności działania urządzenia.

W tym celu należy wybrać: **Logger/Diagnostics/Logger**. Po połączeniu z rejestratorem, system powinien wyświetlić dane diagnostyczne, takie jak, nazwa urządzenia, wersja oprogramowania, informację o podłączonych peryferiach, informację o interfejsach itp. Dodatkowo dostępne są indywidualne testy niektórych urządzeń peryferyjnych.

TELCOM umożliwia również diagnostykę czujników poprzez obserwację sygnałów z nich przychodzących. W celu uruchomienia narzędzia diagnostycznego dla czujników należy wybrać: **Logger/Diagnostic/Sensor**.

Przeprowadzić diagnostykę każdego z dostępnych czujników wpisując w odpowiednie pola wskazane w tabeli 1 wartości. **Start Channel/Stop Channel** definiuje kanał z którego dane wyzwalają akwizycję danych z wybranego w **Record Channel** kanału. Wybierając **GetData**, system uzbraja się i czeka na przejazd testowego pojazdu. Po akwizycji, **ViewGraph** pozwala na wyświetlenie ostatnio zarejestrowanego sygnału. **SaveData** tworzy plik tekstowy z zapisanym przebiegiem, **ViewFile** pozwala podglądać jego zawartość.

Tabela 1

Wartości parametrów do ustawienia w opcji diagnostyki czujników.

Start Channel	Stop Channel	Record Channel	Opis
1	1	1	Pętla A (pas 1)
2	2	2	Pętla B (pas 1)
2	2	17	Czujnik ważący(pas 1)
3	3	3	Pętla C (pas 2)
4	4	4	Pętla D (pas 2)

Zarejestrować i porównać profile magnetyczne oraz sygnały z czujnika ważącego dla różnych modeli pojazdów. Wyniki zapisać w plikach.

Ad 5. Pomiary z pojedynczą pętlą indukcyjną

System w takiej konfiguracji pozwala jedynie na zliczanie pojazdów, które przejechały nad czujnikiem oraz ich klasyfikację ze względu na wartość maksymalną sygnału profilu magnetycznego czyli wysokość podwozia.

W ustawieniach utworzonego już stanowiska pomiarowego (*SiteInfo/SiteData/EditSite*) w zakładce 2/5 należy wybrać w obu pasach jako M-Sensor ruchu pojedynczy czujnik pętlowy (*Loop*). W zakładce 4/5 należy przypisać kanały *Channel* do pasów ruchu – numery *Ch* i *Lane* powinny sobie odpowiadać.

Należy również zmodyfikować połączenie pętli do terminala (podłączyć czujnik C w miejsce B).

W ustawieniach *SetupTEL* należy wybrać program 4.0 oraz klasyfikację RSA L/H(SL) (szczegóły w materiałach pomocniczych). W czasie akwizycji zwrócić uwagę na ograniczoną funkcjonalność takiego rozwiązania oraz reakcje systemu na zmianę wysokości podwozia. Z badać poprawność i skuteczność detekcji pojazdów.

Pamiętać o ponownym podłączeniu czujników w odpowiedniej kolejności przed przejściem do następnych części ćwiczenia!!!

Ad 6. Pomiary w układzie dwupętlowym

Dodanie drugiej pętli pozwala już nie tylko na liczenie pojazdów, ale także pomiar prędkości pojazdu, kierunku jego ruchu oraz długości. Klasyfikacja pojazdów może być już bardziej rozbudowana (rozdzielanie ciężarówki/osobowy na podstawie wysokości podwozia oraz klasyfikacja ciężarówek ze względu na ich długość).

Używając polecenia *SiteInfo/SiteData/EditSite* stanowisko pomiarowe należy zmodyfikować tak, by na obu pasach główne czujniki były podwójnymi pętlami (*2xLoop*). W zakładce 4/5 należy przypisać kanały *Channel* do pasów ruchu – numery *Ch* i *Lane* powinny sobie odpowiadać.

Skonfigurować logger (polecenie: *Logger/SetupTEL*) ustawiając stanowisko „001”, jako program wpisać 2.0, natomiast klasyfikację ustawić na *FHWA Scheme*. Ustawić parametr *Sensor process delay* na stronie 6/12 na 0ms. Przejść do trybu rejestracji (jedno z poleceń *Logger/TrafficInfo*).

Zwrócić uwagę na wyniki klasyfikacji pojazdu w zależności od jego parametrów oraz na wyniki pomiarów szybkości i długości pojazdu. Zadawać przejazdy z różnymi prędkościami. Spróbować określić powtarzalność wyników pomiarów.

Ad 7. Pomiary w układzie dwie pętle i czujnik pojemnościowy

Konfiguracja ta zachowuje funkcjonalność układu dwupętlowego, ale dodatkowo pozwala na pomiar nacisku każdej jego osi oraz masy całkowitej.

W ustawieniach stanowiska pomiarowego na obu pasach należy ustawić jako główne czujniki podwójne pętle (*2xLoop*) natomiast na pasie o numerze *LLn 2* dodatkowo ustawić pojedynczy czujnik pojemnościowy *WCPad*.

W zakładce 4/5 należy przypisać kanały *Channel* do pasów ruchu – numery *Ch* i *Lane* powinny sobie odpowiadać.

Skonfigurować logger (polecenie: **Logger/SetupTEL**): ustawić stanowisko „001”, program: 1.4 oraz klasyfikację *FHWA Scheme*.

Ustawić parametr *Sensor process delay* na stronie 6/12 na 0 ms. Na stronie 3/12 ustawić *Programed Default*: na **No** oraz ustawić wszystkie poniższe parametry na **Yes** (dla *Mass Bins Summary - GVM*). Następnie przejść do trybu rejestracji (jedno z poleceń **Logger/TrafficInfo**).

Zwrócić uwagę na dodatkowe możliwości, jakie uzyskuje się dodając czujnik ważący – liczenie osi, wyznaczanie nacisków każdej z osi oraz masy całkowitej korzystając z rejestracji w trybach **WeighInfo**, **AxleInfo** oraz **Axle&Weigh**.

Aby zapisać plik z danymi zgromadzonymi przez logger należy wybrać polecenie **Logger/ExtractData/Normal**. Wcisnąć *Proceed*. Po zakończeniu ładowania danych wybrać: **Options/FileOptions/Overwrite** oraz **Options/ConvertData/XTXFormat**, a na koniec, *SaveFile* (ewentualnie nadpisując istniejące pliki).

Ad 8. Generowanie raportów

Aby wygenerować raporty z pomiarów należy wyjść z modułu TELCOM wybierając **Quit**. Z poziomu TELSYS wybrać moduł raportujący **Data/Report**. W module tym należy wybrać *SiteData/Report*, a potem odpowiednie stanowisko (**Input/Site**). Wybrać **Setup/List/Current** oraz ustawić na liście po kolei typy raportów. Po wybraniu *Report/Current* wygenerowane zostaną pliki raportów – tekstowe oraz graficzne. Znajdują się one w folderze c:\TELSYS\ i są formatu *report*.grf* lub *report*.rep*.

Pliki tekstowe można obejrzeć z poziomu edytorów dostępnych w systemie operacyjnym, natomiast pliki graficzne można obejrzeć z poziomu programu obsługującego urządzenie pomiarowe, wybierając **Options/ViewFile** i podając nazwę pliku np. c:\TELSYS\REPORT01.GRF.

Wykaz aparatury

1. Komputer z odpowiednim oprogramowaniem,
2. System Raktel-8000 z osprzętem (zasilacz, terminale itp.),
3. Model drogi z zainstalowanymi czujnikami,
4. Modele pojazdów.

Ćwiczenie 5

Wyznaczanie charakterystyk ruchu drogowego

Celem jest zapoznanie studenta z podstawowymi charakterystykami opisującymi zarówno pojedynczy pojazd biorący udział w ruchu drogowym, jak również właściwości strumienia pojazdów poruszających się po wybranym odcinku sieci dróg. Podstawą są dane eksperymentalne zebrane na stanowisku pomiarowym zlokalizowanym w miejscowości Gardawice w okresie kilkunastu miesięcy. Dane powinny zostać przetworzone zgodnie z algorytmami ułożonymi i zaimplementowanymi przez studentów, a wynikiem tego przetwarzania powinny być oceny wybranych charakterystyk.

Instrukcja składa się z dwóch części. Część pierwsza stanowi wprowadzenie teoretyczne do tematu ćwiczenia. Przedstawiono w niej definicje poszczególnych parametrów ruchu oraz sposób ich eksperymentalnego wyznaczania. Część druga zawiera wskazówki bezpośrednio dotyczące wykonywanego ćwiczenia.

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Parametry charakteryzujące pojedynczy pojazd,
 - b. Parametry charakteryzujące układ dwóch pojazdów,
 - c. Charakterystyki strumienia pojazdów (makroskopowe),
 - d. Wskaźniki jakości.
2. Wyznaczenie parametrów ruchu drogowego.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawowe parametry opisujące pojedynczy pojazd, stanowiące podstawę pomiaru globalnych charakterystyk opisujących ruch drogowy oraz metody ich pomiaru.

Literatura

- [1] S. Maerivoet and B. De Moor. *Traffic Flow Theory*. Internal Report 05-154, ESAT-SCD (SISTA), K.U.Leuven (Leuven, Belgium), July, 2005.
- [2] J. Gajda i inni. *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

Do opisu ruchu pojazdów samochodowych wykorzystywane są cztery grupy parametrów i charakterystyk. Są to parametry pojedynczego pojazdu, parametry układu dwóch pojazdów, charakterystyki strumienia pojazdów oraz wskaźniki jakości systemu drogowego. Poniżej przedstawione zostały definicje tych parametrów.

a) Parametry charakteryzujące pojedynczy pojazd

Każdy pojazd poruszający się wybranym pasem ruchu posiada następujące charakterystyczne parametry:

- długość, którą będziemy oznaczać przez l_i ,
- położenie oznaczane przez x_i i umownie rozumiane jako położenie tylnego zderzaka pojazdu,
- szybkość związaną z położeniem znaną zależnością $v_i = \frac{dx_i}{dt}$,
- przyspieszenie określone zależnością $a_i = \frac{d^2x_i}{dt^2}$. Parametr ten zależy nie tylko od właściwości silnika, w jaki jest wyposażony pojazd, ale również od nachylenia drogi, po której się porusza. Nie jest to więc parametr charakteryzujący tylko sam pojazd. W niektórych przypadkach do analizy ruchu pojazdu wykorzystuje się również pochodną przyspieszenia nazywaną w języku angielskim *jerk* lub *jolt*.

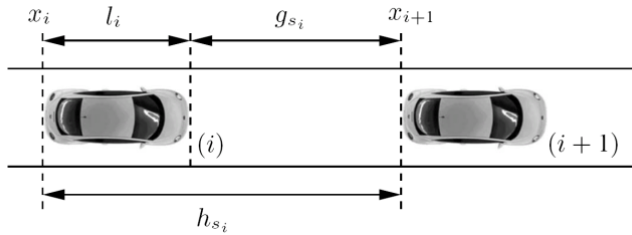
Jest oczywiste, że lista parametrów charakteryzujących indywidualny pojazd jest zdecydowanie dłuższa i zawiera np. szerokość i wysokość pojazdu.

b) Parametry charakteryzujące układ dwóch pojazdów

Parametr opisujący **odległości między pojazdami** może być definiowany na dwa sposoby. Sytuację ilustruje rysunek 1. Odległość ta może być rozumiana jako odległość pomiędzy tylnymi zderzakami h_{si} (*space headway*) lub odległość pomiędzy tylnym zderzakiem pojazdu poprzedzającego i przednim zderzakiem pojazdu następnego g_{si} (*space gap*). Związek pomiędzy nimi wynika bezpośrednio z rysunku 1.

$$h_{si} = g_{si} + l_i \quad (1)$$

Dzieląc zależność (1) obustronnie przez szybkość pojazdów (zakładamy, że poruszają się one z jednakowymi szybkościami, gdyż tylko w takim przypadku zależności odległościowe pozostają stałe) otrzymamy związek (2) pomiędzy parametrami czasowymi opisującymi układ dwóch pojazdów.



Rys. 1. Ilustracja sposobu określania odległości pomiędzy kolejnymi pojazdami [1].

$$h_{ti} = g_{ti} + \rho_i \quad (2)$$

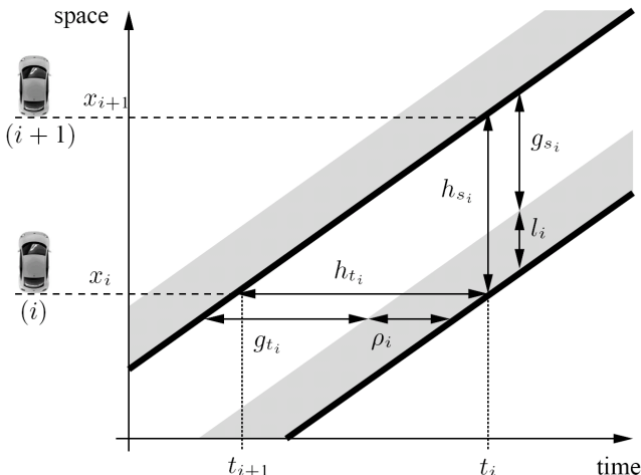
gdzie:

h_{ti} - interwał czasu pomiędzy przekroczeniem stanowiska pomiarowego przez tylne zderzaki dwóch kolejnych pojazdów (*time headway*),

g_{ti} - interwał czasu pomiędzy przekroczeniem stanowiska pomiarowego przez tylny zderzak pojazdu poprzedzającego i przedni pojazdu nadjeżdżającego po nim (*time gap*),

ρ_i - czas zajętości pasa ruchu przez dany pojazd (*occupancy time*). Parametr ten jest interpretowany jako czas potrzebny na przejechanie przez pojazd poruszający się z określoną szybkością, odcinka równego jego długości.

Związki pomiędzy zależnościami przestrzennymi i czasowymi występujące dla dwóch kolejnych pojazdów ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Ilustracja zależności przestrzennych i czasowych pomiędzy dwoma kolejnymi pojazdami poruszającymi się ze stałą szybkością [1].

Rysunek ten ilustruje sytuację, gdy obydwa pojazdy poruszają się z jednakowymi i stałymi szybkościami. Dlatego torę, po których poruszają się obydwa pojazdy, w układzie

współrzędnych czas – droga są równoległymi liniami prostymi. Nazywamy je trajektoriami pojazdu. W przypadku pojazdów przyspieszających na trajektoriach zaobserwujemy zmianę nachylenia. Trajektorja pojazdu nieruchomego jest linią poziomą.

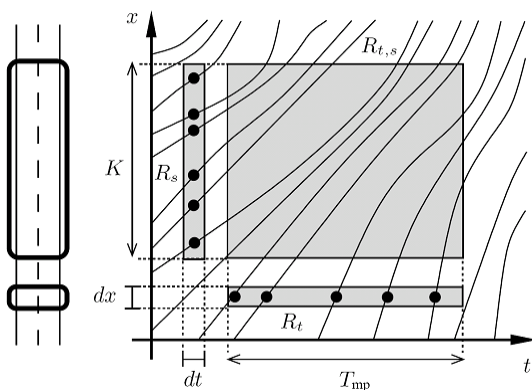
Z zależności (1) i (2) wynika oczywisty związek pomiędzy parametrami przestrzennymi i czasowymi danego pojazdu (3).

$$\frac{h_{si}}{h_{ii}} = \frac{g_{si}}{g_{ii}} = \frac{l_i}{\rho_i} = v_i \quad (3)$$

Przytoczone powyżej parametry charakteryzujące układ dwóch pojazdów dotyczą tylko pojazdów poruszających się po jednym pasie ruchu. Oznacza to, że takie samochody nie mogą się wyprzedzać, zostaje więc zachowana ich kolejność. Łatwo można powyższe zależności zaadaptować dla potrzeb ruchu odbywającego się po kilku pasach ruchu. W takim jednak przypadku kolejność pojazdów nie będzie już zachowana.

e) Charakterystyki strumienia pojazdów (makroskopowe)

W przypadku, gdy przedmiotem obserwacji i pomiaru jest równocześnie wiele różnych pojazdów, które poruszają się z różnymi szybkościami, mogą przyspieszać i hamować, czasowo – przestrzenny wykres ich trajektorii staje się złożony i może wyglądać jak ten przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Trajektorie pojazdów poruszających się po jednym pasie ruchu [1].

Podstawą oceny parametrów ruchu drogowego są oczywiście wyniki przeprowadzonych pomiarów. Ze względu na sposób rozmieszczenia czujników pomiarowych oraz przeprowadzania pomiarów wyróżniamy (w nawiązaniu do rysunku 3) trzy typy obszarów pomiarowych:

- Czasowy obszar pomiarowy R_t odpowiada pomiarom przeprowadzanym w jednym wybranym punkcie (przekroju) pasa ruchu, którego lokalizację oznaczymy przez dx . Pomiaru są prowadzone w określonym przedziale czasu T_{mp} . Przykładem ilustrującym taką sytuację jest pętla indukcyjna zamontowana w danym punkcie drogi.
- Przestrzenny obszar pomiarowy R_s odpowiada pomiarom prowadzonym w pojedynczym momencie czasu dt , na odcinku drogi o długości K . Przykładem ilustrującym taki pomiar jest wykonanie zdjęcia lotniczego wybranego odcinka i policzenie pojazdów znajdujących się na tym odcinku, w chwili wykonania zdjęcia.
- Uogólniony obszar pomiarowy $R_{t,s}$ może posiadać dowolny kształt w układzie czas – przestrzeń. Ograniczmy się jednak do obszarów o kształcie prostokątnym w tym układzie współrzędnych. Przykładem takich pomiarów może być sekwencja zdjęć nagrań kamerą wideo.

Do podstawowych charakterystyk makroskopowych opisujących ruch drogowy należą:

- **Gęstość ruchu** (4) rozumiana jako liczba pojazdów znajdujących się w danym momencie czasu na odcinku drogi o określonej długości (na ogół przyjmuje się odcinki o długości 1 km).

$$k = \frac{N}{K} \quad (4)$$

gdzie:

- N - liczba pojazdów,
- K - długość odcinka pomiarowego.

Z definicji tego parametru wynika, że może on być zmierzony tylko w przestrzennym obszarze pomiarowym R_s . Wyznaczenie gęstości ruchu na podstawie pomiarów prowadzonych w czasowym obszarze R_t wymaga uogólnienia definicji tej charakterystyki. W ogólności gęstość ruchu może być rozumiana jako całkowity czas spędzony przez wszystkie pojazdy znajdujące się w obszarze pomiarów, podzielony przez powierzchnię tego obszaru (5).

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{T_{mp} \cdot dx} = \frac{1}{T_{mp} \cdot dx} \sum_{i=1}^N \frac{dx}{v_i} = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} \quad (5)$$

gdzie:

$\sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N \frac{dx}{v_i}$ - całkowity czas spędzony przez N pojazdów w uogólnionym obszarze pomiarowym o wymiarach T_{mp} (czas trwania pomiaru) i dx (długość stanowiska pomiarowego).

Zależność (5) pozwala wyznaczyć gęstość ruchu na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w czasowym obszarze pomiarowym R_t . Przedmiotem bezpośredniego

pomiaru powinny być szybkości indywidualnych pojazdów, a gęstość jest wyznaczana jako suma odwrotności tych szybkości podzielona przez długość przedziału czasowego, w którym były prowadzone pomiary.

Gęstość ruchu ma związek z odległością pomiędzy pojazdami zgodnie z zależnością (6).

$$k = \frac{N}{K} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N h_{si}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{si}} = \frac{1}{\bar{h}_s} \quad (6)$$

gdzie:

\bar{h}_s - średnia odległość pomiędzy tylnymi zderzakami kolejnych pojazdów.

Idea gęstości ruchu nie uwzględnia klas pojazdów znajdujących się na pasie ruchu. Niezależnie od tego czy są to pojazdy ciężarowe czy samochody osobowe to wyznaczona gęstość będzie jednakowa, jeżeli tylko będzie to taka sama liczba pojazdów na danym odcinku drogi.

- **Przepływ** (pojazdów) jest określony jako liczba pojazdów przejeżdżających przez stanowisko pomiarowe w jednostce czasu. Parametr ten jest opisany zależnością (7).

$$q = \frac{N}{T_{mp}} \quad (7)$$

Jak wynika z przedstawionej definicji przepływu parametr ten można łatwo wyznaczyć na podstawie danych pomiarowych zebranych w czasowym obszarze pomiarowym R_t . Wyznaczenie przepływu w przestrzennym obszarze pomiarów R_s wymaga wprowadzenia jego uogólnionej definicji: jest to całkowity dystans pokonany przez wszystkie pojazdy znajdujące się w obszarze pomiarowym, podzielony przez powierzchnię tego obszaru. Definicji tej odpowiada zależność (8).

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{K \cdot dt} = \frac{1}{K \cdot dt} \sum_{i=1}^N v_i \cdot dt = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N v_i \quad (8)$$

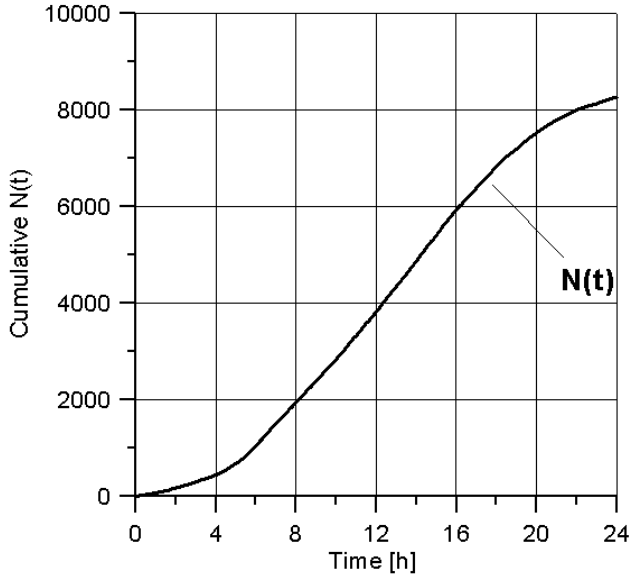
gdzie:

$\sum_{i=1}^N X_i = \sum_{i=1}^N v_i \cdot dt$ - całkowity dystans pokonany przez N pojazdów,

$K \cdot dt$ - powierzchnia przestrzennego obszaru pomiarowego.

- **Skumulowana liczba pojazdów** jest charakterystyką blisko związaną z przepływem. Różnica polega na tym, że tym razem nie wprowadza się unormowania względem czasu pomiaru. Dlatego skumulowana liczba pojazdów jest to narastająca w czasie zawartość licznika pojazdów umieszczonego w danym punkcie sieci drogowej.

Charakterystykę taką nazywa się również diagramem (t, N) . Przykładową charakterystykę przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy diagram (t, N) .

Korzyści wynikające z posługiwania się diagramem (t, N) uwidaczniają się wtedy, gdy sporządzi się takie wykresy dla kolejnych punktów pomiarowych, rozłożonych wzdłuż drogi. Widać wtedy wyraźnie, czy wystąpiły jakiegokolwiek zakłócenia w ruchu strumienia pojazdów, jak duże były to zakłócenia i kiedy miały miejsce.

- **Zajętość** (pasa ruchu) określona jest jako całkowity czas, gdy nad czujnikiem pomiarowym umieszczonym w pasie ruchu przebywał jakiś pojazd, podzielony przez czas pomiarów (9).

$$\rho = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{i=1}^N o_{ii} \quad (9)$$

gdzie:

o_{ii} - czas w którym i -ty pojazd oddziaływał na czujnik pomiarowy.

Czas oddziaływania pojazdu na czujnik zależy zarówno od długości pojazdu, długości strefy wykrywania dla danego czujnika oraz szybkości pojazdu, zgodnie z zależnością (10).

$$o_{ii} = \frac{l_i + K_s}{v_i} \quad (10)$$

gdzie:

l_i - długość pojazdu,

K_s - strefa oddziaływania czujnika (strefa detekcji).

Zajętość pasa ruchu jest związana z gęstością ruchu dosyć oczywistą zależnością (11).

$$\rho = \bar{l} \cdot k \quad (11)$$

gdzie:

\bar{l} - średnia długość pojazdów przebywających w danej chwili na zadanym odcinku drogi.

Przekształcając zależność (10) otrzymamy wzór pozwalający wyliczyć zajętość pasa ruchu na podstawie pomiarów przeprowadzonych w przestrzennym obszarze pomiarowym R_s (12).

$$\rho = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \right) \cdot \frac{N}{K} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N l_i \quad (12)$$

- **Średnia szybkość** jest w ogólnym przypadku rozumiana jako całkowity dystans przejechany przez wszystkie pojazdy znajdujące się w obszarze pomiarowym, podzielony przez całkowity czas spędzony w tym obszarze. Zależność opisująca tak zdefiniowaną średnią szybkość zależy od obszaru, w którym są prowadzone pomiary, zgodnie z (13).

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{\sum_{i=1}^N T_i} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N v_i dt}{N dt} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i & \text{- w obszarze } R_s \\ \frac{N dx}{\sum_{i=1}^N \frac{dx}{v_i}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} & \text{- w obszarze } R_t \end{cases} \quad (13)$$

Szybkość (13) jest nazywana średnią szybkością podróży. Średnia arytmetyczna szybkości kolejnych pojazdów, zmierzonych w obszarze pomiarowym R_t jest natomiast opisana zależnością (14) i jest nazywana szybkością średnią w czasie.

$$\bar{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (14)$$

W zależności od obszaru pomiarów szybkość v_i ma różną interpretację fizyczną. Zaleca się Czytelnikowi przeanalizować to zagadnienie samodzielnie.

d) Wskaźniki jakości

Wskaźniki jakości (obsługi uczestników) ruchu drogowego informują o poczuciu komfortu i zdolności systemu drogowego do zaspokojenia potrzeb jego użytkowników. Do wskaźników takich zaliczamy: współczynnik godziny szczytu, czas podróży, poziom obsługi oraz efektywność (systemu drogowego).

- **Współczynnik godziny szczytu (PHF)** jest zdefiniowany jako iloraz średniego przepływu w godzinie dnia, w której ten przepływ jest największy $\bar{q}|_{60}$ i przepływu w okresie jednego kwadransu z tej godziny $\bar{q}|_{15}$ (15).

$$PHF = \frac{\bar{q}|_{60}}{\bar{q}|_{15}} \quad (15)$$

Dla lepszej ilustracji przytoczonej definicji wyobraźmy sobie, że podczas godziny porannego szczytu zmierzylśmy w czasie jednej godziny tj. od 7:00 do 8:00 kolejno przepływ 3500, 6600, 6200, i 4500 pojazdów/godzinę w każdym kwadransie. Stąd średni przepływ w ciągu całej godziny wynosi $\bar{q}|_{60} = 5200$ pojazdów/godzinę. Maksymalny przepływ 15-minutowy wynosi $\bar{q}|_{15} = 6600$ pojazdów/godzinę. Wyliczony na tej podstawie współczynnik godziny szczytu wynosi $PHF=0.78$.

- Parametr nazwany **czasem podróży** pozwala kierowcy zaplanować podróż. Jest on określony jako czas pokonania trasy pomiędzy dwoma wybranymi punktami. W literaturze można spotkać różne definicje tego parametru, rzutujące również na sposób jego pomiaru. Na nasze potrzeby przyjmiemy najprostszą, określającą czas podróży jako iloraz odcinka drogi i średniej szybkości podróży (16).

$$T(t_0) = \frac{K}{\bar{v}_s(t_0)} \quad (16)$$

Należy zwrócić uwagę, że parametr ten zmienia się w czasie, w zależności od średniej szybkości podróży, wynikającej w warunków jazdy.

- **Poziom obsługi** (Level of Service - *LOS*) (użytkownika systemu drogowego) zależy od takich parametrów jak gęstość ruchu, zajętość pasa ruchu i średnia szybkość, czyli od czynników, które determinują komfort jazdy odczuwany przez kierowcę. Nie można podać ścisłej definicji tego parametru. Jest on natomiast zależny od przedziałów wartości, w których są zawarte wszystkie trzy, wymienione parametry, zgodnie z tabelą 1. Poziom obsługi jest oznaczany literami od A do F, gdzie literze A odpowiada najwyższy komfort jazdy a literze F najniższy.
- **Efektywność** systemu drogowego jest zdefiniowana przez iloraz całkowitej liczby kilometrów przejechanych przez pojazdy i całkowitego zużytego na to czasu (17).

$$\eta = \frac{VDT/VHT}{\bar{v}_{sust}} \quad (17)$$

gdzie:

$VDT = qK$ - całkowity przejechany dystans,

$VHT = \frac{VDT}{\bar{v}_s}$ - całkowita liczba godzin „przejechana” przez wszystkie pojazdy,

\bar{v}_{sust} - średnia szybkość długookresowa na danym odcinku wyznaczona np. za okres doby.

Tabela 1.

Określenie poziomów obsługi przez system drogowy [1].

LOS	Density (veh/km)	Occupancy (%)	Speed (km/h)
A	0 → 7	0 → 5	≥ 97
B	7 → 12	5 → 8	≥ 92
C	12 → 19	8 → 12	≥ 87
D	19 → 26	12 → 17	≥ 74
E	26 → 42	17 → 28	≥ 48
F	42 → 62 > 62	28 → 42 > 42	< 48

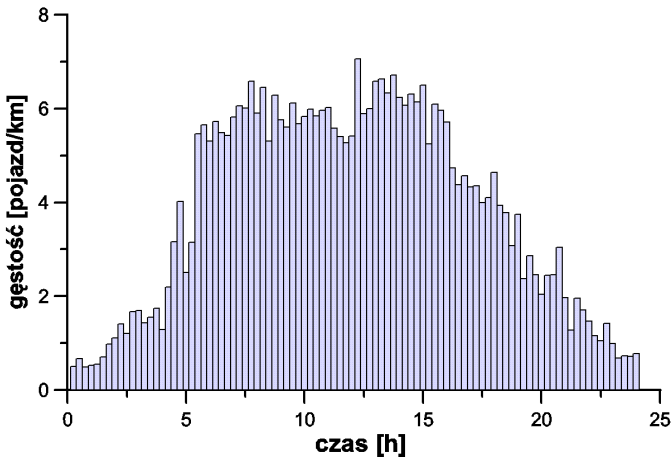
Efektywność wylicza się dla całej sieci drogowej. Jak widać jest ona wielkością bezwymiarową, zawierającą się w przedziale wartości 0 – 1.

Ad 2. Wyznaczenie parametrów ruchu drogowego

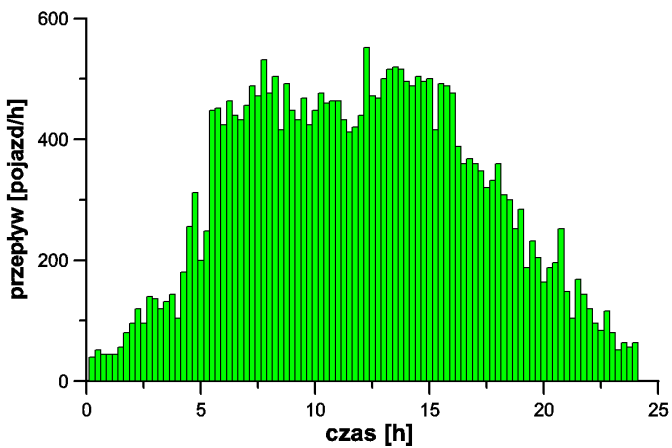
Udostępnione zbiory danych zawierają wyniki pomiaru parametrów pojedynczych pojazdów. Dane te zostały uzyskane w czasowym obszarze pomiarowym R_i . Są one ułożone w pliku, w taki sposób, że wyniki pomiaru parametrów każdego pojazdu zawarte są w osobnym wierszu tego pliku. Zawartość poszczególnych kolumn jest opisana w zbiorze „opis.doc” znajdującym się również na udostępnionym nośniku. Na podstawie udostępnionych danych należy:

- I. Wyznaczyć gęstość ruchu i przedstawić wynik w postaci histogramu ilustrującego zmienność tego parametru w ciągu jednej doby. Gęstość należy wyznaczać w kolejnych okresach 15-minutowych. Przykładowy wynik przedstawiono na rysunku 5.
- II. Wykorzystując te same dane proszę wyznaczyć zmienność przepływu (pojazdów) w ciągu doby. Obliczenia proszę przeprowadzić dla kolejnych 15-minutowych okresów. Proszę również sporządzić diagram (t, N) . Na podstawie uzyskanych wyników proszę sformułować wnioski dotyczące stacjonarności parametrów ruchu pojazdów w danym punkcie sieci drogowej. Na rysunku 6 przedstawiono przykładową charakterystykę gęstości w funkcji czasu.

Wyliczyć jak w tym samym czasie zmienia się liczba pojazdów znajdujących się na odcinku 1 km drogi.



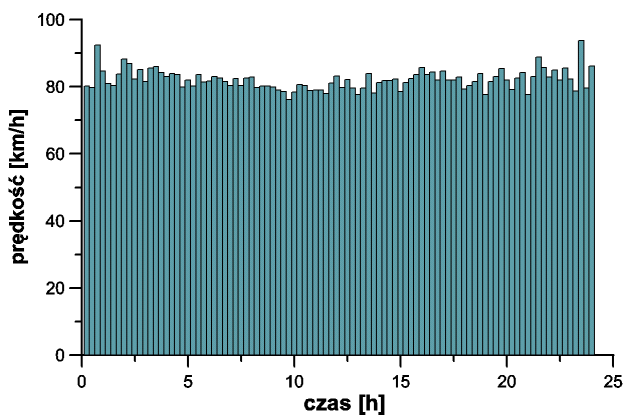
Rys. 5. Zmienność gęstości ruchu w ciągu jednej doby.



Rys. 6. Zmienność przepływu w ciągu jednej doby.

Przyjmując, że obszar detekcji stosowanej pętli indukcyjnej wynosi 2 m, a długości pojazdów 5 m, proszę wyznaczyć zmienność zajętości pasa ruchu w funkcji czasu, dla kolejnych 15-minutowych przedziałów.

- III. Wyznaczyć średnią szybkość podróży i szybkość średnią w czasie w kolejnych 15-minutowych interwałach doby. Porównując obie charakterystyki proszę skomentować uzyskany wynik. Przykładową charakterystykę przedstawiono na rysunku 7.
- IV. Ocenić jak w ciągu jednej doby zmieniał się czas podróży potrzebny do pokonania drogi o długości 1 km.
- V. Na podstawie charakterystyk wyznaczonych w poszczególnych punktach proszę ocenić poziom obsługi (przez system drogowy) w poszczególnych porach doby.



Rys. 7. Zmienność średniej szybkości podróży w funkcji czasu, w okresie jednej doby.

Wykaz aparatury

1. Komputer z pakietem Matlab,
2. Zbiór danych pomiarowych.

Ćwiczenie 6

Zastosowanie czujników indukcyjnych pętlowych w pomiarach parametrów pojazdów

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową i właściwościami czujników indukcyjnych pętlowych oraz układami kondycjonowania współpracującymi z takimi czujnikami. Pozyskiwanie sygnału tzw. profilu magnetycznego pojazdu oraz jego wykorzystanie do pomiaru prędkości pojazdu z pojedynczej pętli, z układu dwóch pętli, a także przedstawienie możliwości klasyfikacji pojazdów w oparciu o profile magnetyczne.

Program ćwiczenia

1. Wstęp.
2. Opis laboratoryjnego stanowiska pomiarowego.
3. Pomiar prędkości i długości elektrycznej zastępczej pojazdu w układzie dwupętlowym.
4. Pomiar prędkości i długości elektrycznej zastępczej pojazdu w układzie jedнопętlowym.
5. Analiza możliwości klasyfikowania pojazdów na podstawie profilu magnetycznego.
6. Wykorzystanie systemu Traffic-1 do współpracy z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi.

Zakres wymaganych wiadomości

Podstawy programowania w języku C++, Labview lub Matlab. Interface RS232. Podstawy elektroniki, układy aplikacyjne wzmacniaczy operacyjnych. Pomiary parametrów impedancyjnych metodami mostkowymi. Obsługa oscyloskopu cyfrowego.

Literatura

- [1] *Traffic Detector Handbook*. Third Edition. Federal Highway Administration, Publication No FHWA-HRT-06-108, 2006,
- [2] Materiały pomocnicze dostępne na stronie Katedry Metrologii AGH.
- [3] J. Gajda i inni. *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

Pomiary wybranych parametrów ruchu drogowego wykonywane mogą być przy zastosowaniu indukcyjnych czujników pętlowych. Czujniki te w formie kilkuzwojowej cewki o określonych wymiarach (np. 1.5 x 2 m) montowane są w nawierzchni drogi na

głębokości 2÷5 cm. Pojazd samochodowy przejeżdżający nad czujnikiem powoduje zmianę jego parametrów, tzn. indukcyjności oraz rezystancji. Zmiany te przetworzone w odpowiednio skonstruowanym układzie elektronicznym (układy kondycjonowania sygnału) umożliwiają pomiar zarówno parametrów ruchu strumienia pojazdów na monitorowanej drodze (np. natężenia ruchu, średniej prędkości pojazdów, zajętości pasa drogi) jak i parametrów dotyczących poszczególnych pojazdów (np. prędkość pojazdu, jego elektryczna długość zastępcza). Możliwy jest także pomiar tzw. profilu magnetycznego pojazdu, na podstawie którego możliwe jest przeprowadzenie klasyfikacji tego pojazdu.

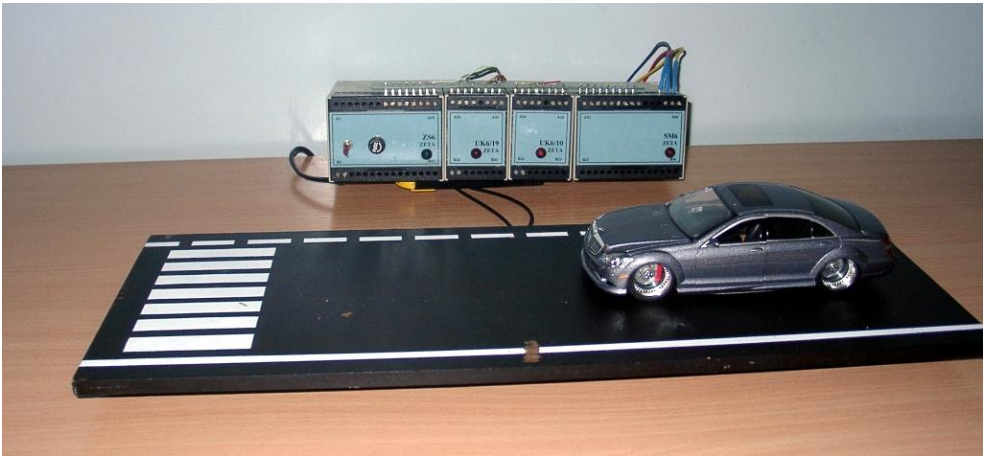
Konstruowane są dwa typy układów kondycjonowania sygnału współpracujących z indukcyjnymi czujnikami pętlowymi – układy generatorów, których częstotliwość generacji zależy od indukcyjności czujnika, a miarą zmian parametrów czujnika jest zmiana częstotliwości sygnału oraz układy z modulacją amplitudy sygnału, zależną od parametrów czujnika. W ćwiczeniu stosowana jest metoda modulacji amplitudy z wykorzystaniem układu wstępnie zrównoważonego mostka Maxwella-Wiena, w którym czujnik umieszczony jest w jednej z jego gałęzi. Zmiana parametrów czujnika wywołana obecnością pojazdu w strefie jego detekcji powoduje pojawienie się sygnału nierównowagi mostka, który po odpowiednim wzmocnieniu i synchronicznej demodulacji jest sygnałem wyjściowym układu. Jest to sygnał tzw. profilu magnetycznego pojazdu. Sygnał ten jest jednocześnie sygnałem obecności pojazdu w strefie detekcji czujnika (zwykle jest on przetwarzany na postać cyfrową).

Ad 2. Opis laboratoryjnego stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe (rys. 1) wyposażone jest w:

- model drogi z umieszczonymi dwoma indukcyjnymi czujnikami pętlowymi,
- dwa moduły układów kondycjonowania sygnałów czujników pracujące w oparciu o metodę modulacji amplitudy,
- moduł zasilacza,
- moduł systemu mikroprocesorowego.

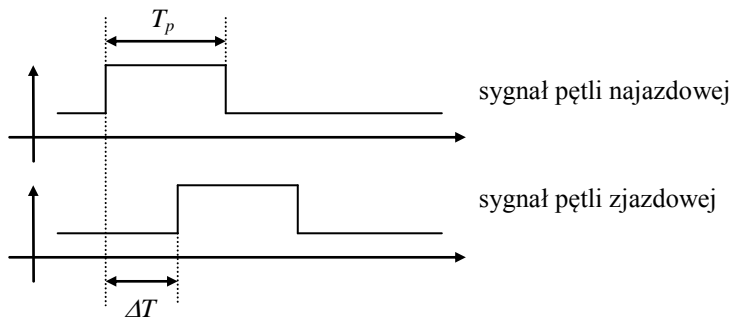
Poszczególne moduły stanowiska umieszczono w obudowach przemysłowych typu ERNI i zamocowano na wspólnej szynie montażowej. Poszczególne moduły połączone są wspólną listwą, zapewniającą doprowadzenie odpowiednich napięć zasilających i wyprowadzenie sygnałów wyjściowych modułów kondycjonowania. Stanowisko wyposażone jest również w dwa modele różnych samochodów używane do przeprowadzania kolejnych eksperymentów. Przygotowanie stanowiska do pracy wymaga odpowiedniego podłączenia czujników pętlowych do modułów kondycjonowania sygnału oraz podania sygnałów wyjściowych z układów kondycjonowania na wejścia oscyloskopu bądź innych urządzeń rejestrujących (karty przetworników A/C). Moduł systemu mikroprocesorowego wykorzystuje sygnały cyfrowe obu układów kondycjonowania. Jego program wylicza na ich podstawie prędkość i długość elektryczną pojazdu, a uzyskane wyniki dostępne są poprzez interfejs RS232.



Rys. 1. Laboratoryjne stanowisko pomiarowe.

Ad 3. Pomiar prędkości i długości elektrycznej zastępczej pojazdu w układzie dwupętlowym

- Przeprowadzić kilka eksperymentów polegających na „przejechaniu” modelem samochodu przez obszar działania czujników pętlowych, każdorazowo rejestrując cyfrowe sygnały wyjściowe układów kondycjonowania (sygnały obecności pojazdu).
- Dla każdego eksperymentu obliczyć prędkość pojazdu oraz jego długość zastępczą według poniższego algorytmu.



Prędkość pojazdu:

$$V_p = \frac{L}{\Delta T} \quad (1)$$

Długość zastępcza pojazdu:

$$D_p = V_p \cdot T_p \quad (2)$$

gdzie: L – odległość między krawędziami najazdowymi czujników.

- c) Sprawdzić, czy uzyskiwane wyniki pomiarów długości pojazdu zależą od jego prędkości oraz sposobu przejazdu przez stanowisko.

Ad 4. Pomiar prędkości i długości elektrycznej zastępczej pojazdu w układzie jednopętlowym

- a) Przeprowadzić kilka eksperymentów polegających na „przejechaniu” modelem samochodu przez obszar działania czujników pętlowych, każdorazowo rejestrując cyfrowe sygnały wyjściowe układów kondycjonowania współpracujących z obiema pętlami oraz sygnał profilu magnetycznego pojazdu uzyskanego z pętli najazdowej,
- b) Na podstawie zarejestrowanego profilu magnetycznego pojazdu wyznaczyć jego prędkość, stosując metodę obliczenia maksymalnej pochodnej narastania sygnału,
- c) Obliczyć w każdym przypadku prędkość na podstawie sygnałów cyfrowych,
- d) Na podstawie wyników uzyskanych w punktach b i c , obliczyć współczynnik kalibracji prędkości mierzonej w układzie z pojedynczą pętlą indukcyjną,
- e) Obliczyć długość elektryczną zastępczą pojazdu na podstawie prędkości zmierzonej w układzie jednopętlowym oraz zarejestrowanego czasu trwania sygnału obecności pojazdu nad pętlą najazdową.

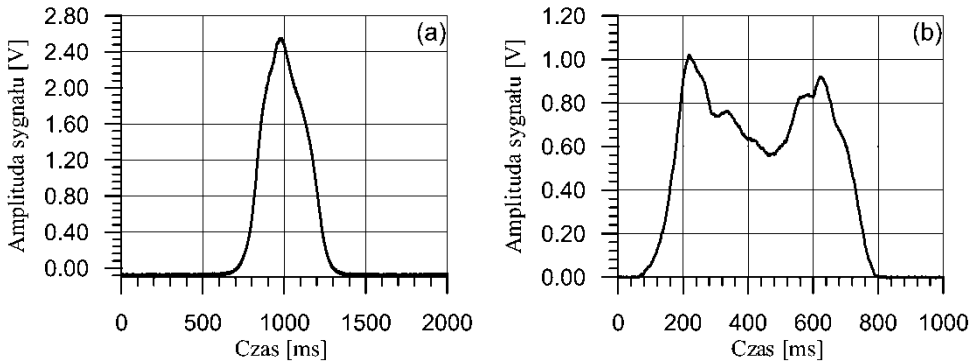
Ad 5. Analiza możliwości klasyfikowania pojazdów na podstawie profilu magnetycznego

- a) Przeprowadzić kilka eksperymentów polegających na „przejechaniu” modelami różnych samochodów przez obszar działania czujników pętlowych, każdorazowo rejestrując sygnał profilu magnetycznego pojazdu (rys. 2).
- b) Zaproponować algorytm rozpoznawania typu pojazdu na podstawie kształtu profilu magnetycznego. Należy uwzględnić zależność profilu od prędkości pojazdu oraz sposobu przejazdu przez stanowisko pomiarowe.
- c) Zaproponować metodę umożliwiającą zbudowanie zestawu „wzorcowych” profili magnetycznych dla różnych typów pojazdów.
- d) Napisać program rozpoznający typ pojazdu na podstawie profilu magnetycznego wykorzystujący dostarczony zestaw danych zarejestrowanych na rzeczywistym stanowisku pomiarowym.

Ad 6. Wykorzystanie systemu Traffic-1 do współpracy z czujnikami indukcyjnymi pętlowymi

Skonfigurować system Traffic 1 (tj. dobrać odpowiednie moduły kondycjonowania do odpowiednich czujników, ustawić nr stanowiska pomiarowego, czas, datę itp.). Przeprowadzić pomiary prędkości i długości pojazdów wykorzystując pojedynczy czujnik

indukcyjny pętlowy i zestaw dwóch takich czujników. Zwrócić uwagę na zestaw parametrów mierzonych w każdym przypadku oraz na możliwość pomiaru parametrów i charakterystyk globalnych (np. histogramów mierzonych parametrów). Zwrócić również uwagę na wyniki klasyfikacji pojazdów.



Rys. 2. Przykładowe sygnały profili magnetycznych różnych pojazdów;
a) samochód osobowy, b) autobus.

Wykaz aparatury

1. Laboratoryjne stanowisko pomiarowe do demonstracji działania układów współpracujących z indukcyjnymi czujnikami pętlowymi,
2. Oscyloskop cyfrowy,
3. Komputer PC wyposażony w kartę akwizycji danych pomiarowych.

Ćwiczenie 7

Ważenie pojazdów w ruchu - metody i algorytmy

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodami i systemami ważenia pojazdów w ruchu. Analizowane będą systemy z różnymi rodzajami czujników ważących (piezoelektryczne, kwarcowe) i pracującymi w różnych konfiguracjach. Studenci zostaną zapoznani z algorytmami przetwarzania sygnałów z czujników ważących, korekcją uzyskiwanych wyników (eliminującą wpływ temperatury) oraz metodami kalibracji systemów ważących.

Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się z czujnikami i ich konfiguracjami w systemach ważenia pojazdów w ruchu.
2. Algorytmy przetwarzania sygnałów z czujników nacisku.
3. Kalibracja i określenie dokładności systemów WIM (Weigh-In-Motion).

Zakres wymaganych wiadomości

Zasady budowy i działania czujników nacisku stosowanych do ważenia pojazdów (piezoelektryczne, kwarcowe, pojemnościowe) oraz czujników do detekcji pojazdów (indukcyjne pętlowe). Algorytmy wyznaczania nacisku osi dla czujników kwarcowych i piezoelektrycznych. Konfiguracje czujników w systemach WIM. Metody kalibracji systemów WIM.

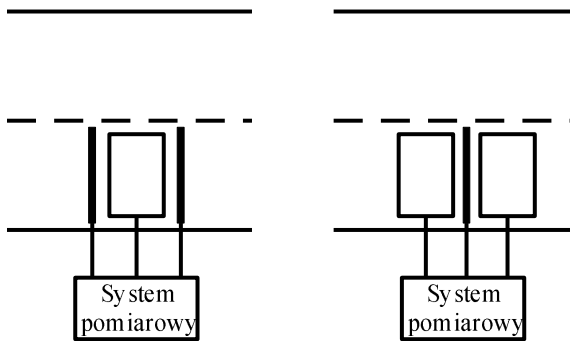
Literatura

- [1] D. Cebon. *Weigh-in-motion of Road Vehicles for Europe (WAVE)* – Report of Work Package 1.1 – Multiple sensor WIM. May. 2001.
- [2] C. Jacob. *COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles*. Final Report, LCPC Publications, Paris, 2002.
- [3] Materiały pomocnicze dostępne na stronie Katedry Metrologii AGH.
- [4] D. Stanczyk. *New Calibration Procedure by Axle Rank*. Proceedings of the Final Symposium of the Project WAVE, Paris, 1999, pp. 307-316.
- [5] J. Gajda i inni. *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Zapoznanie się z czujnikami i ich konfiguracjami w systemach ważenia pojazdów w ruchu

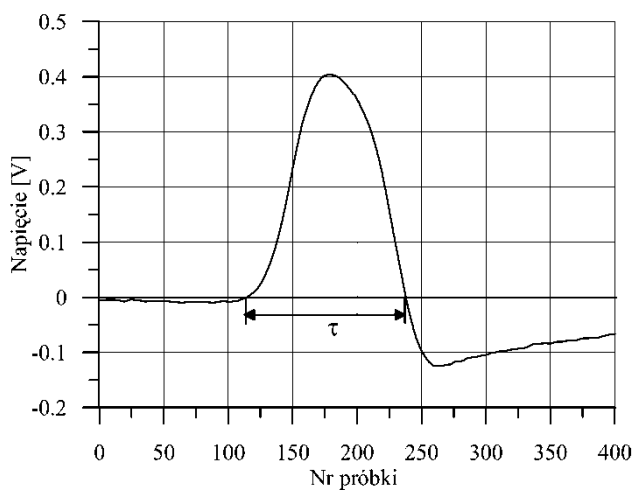
W systemach ważenia pojazdów w ruchu wykorzystuje się najczęściej czujniki: piezoelektryczne, kwarcowe i pojemnościowe. Z ich budową, wadami i zaletami można zapoznać się w materiałach pomocniczych do ćwiczenia. Czujniki te mają różne szerokości w kierunku jazdy pojazdu (od 2 cm do 40-50 cm). Konsekwencją tego są różne metody przetwarzania sygnałów z takich czujników. Zwrócić uwagę na charakterystyki czułości czujników ważących i ich wrażliwość na wpływ temperatury. Typowe konfiguracje czujników ważących przedstawiono na rysunku 1. Często systemy takie uzupełniane są o czujnik temperatury nawierzchni jezdni, a w oparciu o wyniki pomiaru temperatury, możliwa jest korekcja jej wpływu na wyniki ważenia.



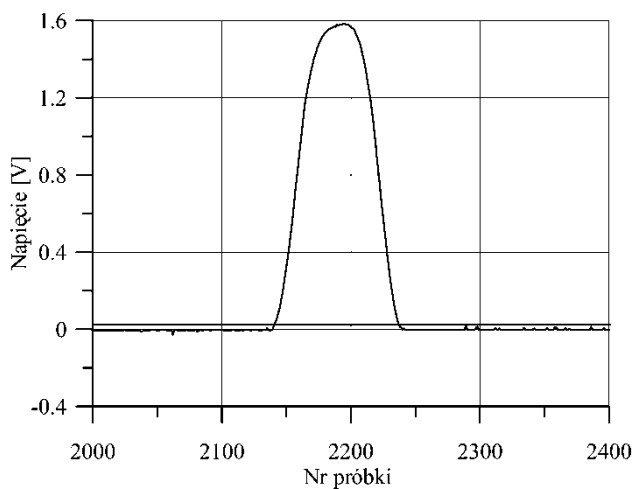
Rys. 1. Typowe konfiguracje czujników w systemach ważących.

Ad 2. Algorytmy przetwarzania sygnałów z czujników nacisku

W zależności od rodzaju zastosowanych czujników nacisku uzyskuje się różne kształty sygnałów i stosuje się różne algorytmy ich przetwarzania w celu wyznaczenia wartości nacisku koła pojazdu na podłoże. W ćwiczeniu będą brane pod uwagę sygnały z czujnika piezoelektrycznego i kwarcowego. Przykładowe sygnały uzyskiwane z takich czujników przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Ze względu na fakt, że czujniki te są bardzo wąskie i koło nigdy w całości nie znajduje się tylko na czujniku, ale jest również oparte na nawierzchni jezdni, estymacja nacisku W , pojedynczej osi pojazdu wymaga, spróbkowania sygnału z czujnika nacisku oraz zastosowania odpowiedniego algorytmu, który przetwarza uzyskane próbki, uwzględniając dodatkowo informację o aktualnej, prędkości V , analizowanej osi pojazdu. Sygnał $w(t)$ generowany przez czujnik nacisku w czasie przetaczania się przez niego kół ważonej osi, przetwarzany jest zgodnie z zależnością (1) dla czujnika piezoelektrycznego i zgodnie z zależnością (2) dla czujnika kwarcowego.



Rys. 2. Przykładowy sygnał uzyskiwany z czujnika piezoelektrycznego dla jednej osi pojazdu.



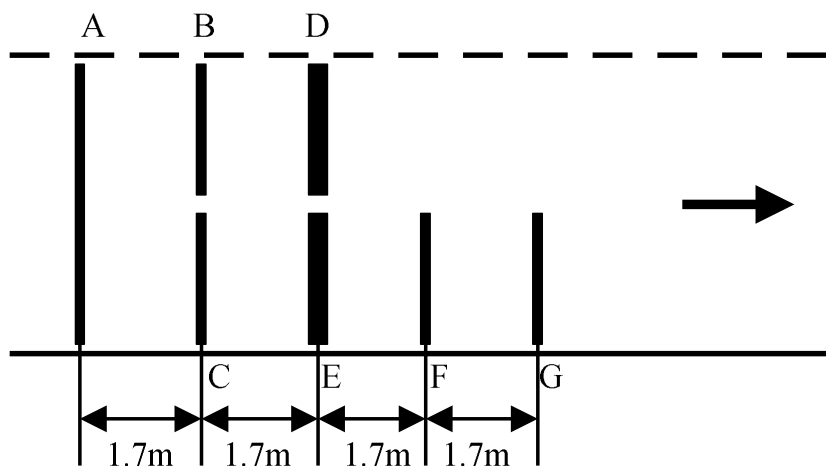
Rys. 3. Przykładowy sygnał uzyskiwany z czujnika kwarcowego dla jednej osi pojazdu.

$$W = k_1 \cdot V \cdot \tau \cdot \int_0^{\tau} w(t) dt \quad (1)$$

$$W = k_2 \cdot V \cdot \int_0^{\tau} w(t) dt \quad (2)$$

gdzie: τ – czas trwania sygnału z czujnika piezoelektrycznego,
 k_1, k_2 – stałe współczynniki skalujące,

Należy zaimplementować podane wyżej algorytmy i przetestować ich działanie na danych zarejestrowanych na terenowym stanowisku pomiarowym (dane znajdują się na płycie dołączonej do instrukcji). Częstotliwość próbkowania wynosi 6250 Hz, a rejestrowanych było 25000 próbek. W każdym pliku rejestrowane są dane z czujników piezoelektrycznych (kolumna A, B, C, F i G) oraz z czujników kwarcowych (kolumna D i E). Rozmieszczenie czujników na stanowisku przedstawia rysunek 4 (oznaczenie czujników na rysunku odpowiada kolumnom danych z tych czujników).



Rys. 4. Rozmieszczenie czujników na stanowisku pomiarowym.

Należy zwrócić uwagę na dokładność pomiaru prędkości, w związku z tym, że wchodzi ona do algorytmu estymacji nacisku i niedokładność jej pomiaru bezpośrednio przenosi się na niedokładność wyniku końcowego. Zwykle, mierzona jest średnia prędkość pojazdu na stanowisku pomiarowym, zgodnie z definicją, na podstawie sygnałów z dwóch czujników nacisku zlokalizowanych w znanej i dokładnie określonej odległości (patrz rys. 4).

W przypadku czujników piezoelektrycznych, nie należy mierzyć nacisków osi pojazdów poruszających się z prędkością mniejszą niż 30 km/h, ze względu na duże błędy pomiaru.

Współczynniki skalujące spróbować dobrać na podstawie podanych nacisków osi wyznaczonych w warunkach statycznych (patrz plik OPIS_DANYCH.DOC), tak aby uzyskiwany z algorytmu wynik był dobrze skorelowany z naciskiem statycznym.

Ad 3. Kalibracja i określenie dokładności systemów WIM

Istnieje wiele różnych metod kalibracji systemów WIM. Najprostszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą jest metoda pojazdu wstępnie zważonego. Polega ona na wielokrotnym przejeździe pojazdów kalibrujących, o wyznaczonych wcześniej naciskach statycznych osi i masach całkowitych, przez stanowisko pomiarowe.

Należy określić relację między znanymi naciskami statycznymi, a uzyskanymi z systemu WIM wynikami pomiarów dynamicznych. Często porównanie takie wykonuje się dla masy całkowitej pojazdu.

Ogólną zależność liniową między wynikiem skalibrowanym i nieskalibrowanym (bezpośrednio z systemu) dla i -tego pojazdu w k -tym eksperymencie (w k -tym przejeździe przez stanowisko) opisuje równanie (3).

$$Wd_{i,k} = \frac{1}{C} \cdot Ws_{i,k} + b \quad (3)$$

gdzie: $Wd_{i,k}$ - nieskalibrowany wynik ważenia k -tego pojazdu uzyskany w i -tym przejeździe, $Ws_{i,k}$ - skalibrowany wynik ważenia, C , b - współczynniki kalibracji.

Często kalibracja ogranicza się do wyznaczenia jedynie współczynnika C . Jeśli minimalizowany ma być błąd średniokwadratowy wyników ważenia, współczynnik ten wyliczyć można na podstawie zależności:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^{ks} n_k \cdot (Ws_k)^2}{\sum_{k=1}^{ks} \left(Ws_k \sum_{i=1}^{n_k} Wd_{i,k} \right)} \quad (4)$$

gdzie: n_k - liczba przejazdów k -tego pojazdu, ks - liczba wstępnie zważonych pojazdów używanych w procesie kalibracji,

W przypadku, gdy do kalibracji użyty był tylko jeden pojazd kalibrujący, zależność (4) przyjmuje postać:

$$C = \frac{Ws}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Wd_k} \quad (5)$$

Na podstawie danych zarejestrowanych w czasie procesu kalibracji systemu WIM wyznaczyć współczynnik kalibracji tego systemu. Dane dostępne są na załączonej płycie. Dane dotyczą masy całkowitej pojazdu.

Zwrócić uwagę na zmienność wyników ważenia w funkcji temperatury. Przeprowadzić korekcję wpływu temperatury przed kalibracją systemu.

Po wyznaczeniu współczynnika kalibracji wykorzystać plik z danymi weryfikującymi, do określenia dokładności skalibrowanego systemu WIM. Dane do weryfikacji załączone są na płycie. Wyznaczać względne błędy pomiaru dla każdego pojedynczego przejazdu pojazdu kalibrującego. Wyznaczyć zbiorczą charakterystykę (charakterystykę niezawodności) dla całego systemu opisaną zależnością:

$$\Pr(\delta) = 1 - P(\delta) \quad (6)$$

gdzie:

- $\delta = \left| \frac{\hat{F}_0 - F_0}{F_0} \right|$ – moduł względnego błędu pomiaru np. masy całkowitej wyznaczonej w warunkach statycznych - F_0 ,
- \hat{F}_0 – ocena masy na podstawie pomiaru dynamicznego,
- $P(\delta)$ – dystrybuanta błędu δ wyznaczona na podstawie wyników uzyskanych dla strumienia pojazdów.

Wykaz aparatury

1. Komputer,
2. Sygnały zarejestrowane z czujników nacisku,
3. Dane zarejestrowane w systemach ważących.

URZĄDZENIA ELEKTRONIKI SPINOWEJ

opracowali:

dr inż. Jarosław Kanak

dr inż. Piotr Wiśniowski

mgr inż. Witold Skowroński

dr Maciej Czapkiewicz

Ćwiczenie 1

Badania elementów elektroniki spinowej na przykładzie zaworu spinowego GMR i złącza tunelowego TMR – pomiar podstawowych charakterystyk elektrycznych i magnetycznych

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze spintronicznymi elementami GMR/TMR typu zawór spinowy. Pomiary podstawowych charakterystyk magneto-elektrycznych elementów GMR i TMR oraz wyznaczanie ich parametrów.

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a) Efekt GMR i TMR,
 - b) Zawór spinowy,
 - c) Parametry zaworu spinowego,
2. Pomiary charakterystyk elektrycznych i magnetycznych elementów GMR i TMR
 - a) Pomiary charakterystyk rezystancja-natężenie pola magnetycznego $R(H)$ elementów GMR i TMR,
 - b) Pomiary charakterystyk prąd-napięcie $I(V)$ elementów TMR.

Zakres wymaganych wiadomości

Efekt gigantycznej magnetorezystancji GMR, efekt tunelowej magnetorezystancji TMR, elementy magnetorezystancyjne GMR/TMR - zasada działania, zawór spinowy na przykładzie elementów GMR/TMR, charakterystyki elementów GMR oraz TMR, pola przełączeń, pole koercji, pola sprzężeń międzywarstwowych.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

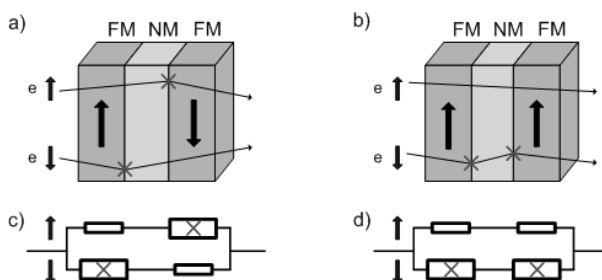
Ad 1. Wstęp

a) Efekt GMR i TMR

Zjawisko gigantycznej magnetorezystancji (GMR – *Giant Magnetoresistance*) polega na zmianie rezystancji układu cienkich warstw w zależności od ustawienia namagnesowań warstw ferromagnetycznych (FM), przedzielonych niemagnetyczną przekładką metaliczną (NM) (rys. 1). Zmianie konfiguracji magnetycznej z ustawienia antyrównoległego (rys. 1a) na równoległe (rys. 1b) towarzyszy spadek rezystancji od kilku do kilkudziesięciu procent. W zależności od wzajemnego kierunku namagnesowania warstw FM układ wykazuje stan niskiej lub wysokiej rezystancji. Różnica rezystancji w konfiguracji antyrównoległej (R_{AR}) i równoległej (R_R) do rezystancji w konfiguracji równoległej definiuje parametr GMR wyrażony wzorem:

$$GMR = \frac{R_{AR} - R_R}{R_R} \cdot 100\% \quad (1)$$

Efekt ten można w uproszczeniu wyjaśnić za pomocą dwukanałowego, ze względu na kierunek spinu elektronów przewodnictwa, rozpraszania. W przypadku antyrównoległego namagnesowania warstw (rys. 1a) rozpraszanie elektronów ze spinami skierowanymi w górę jest takie samo jak dla elektronów o spinach w dół. Ustawienie równoległe namagnesowań (rys. 1b) powoduje brak rozpraszania dla elektronów ze spinem w górę i wzrost rozpraszania dla elektronów ze spinem w dół. Należy pamiętać, że ten prosty model jest słuszny przy zaniedbaniu innych, niż spinowo zależny, mechanizmów rozpraszania elektronów przewodnictwa. Wspomniany model można zilustrować za pomocą układu rezystorów. Dla układu jak na rysunku 1c rezystancja zastępcza jest większa niż w przypadku układu przedstawionego na rysunku 1d.

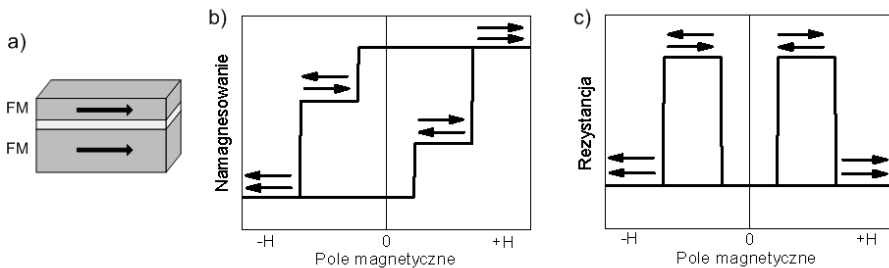


Rys. 1. Dwie warstwy ferromagnetyczne (FM) przedzielone niemagnetyczną przekładką metaliczną (NM). Rozpraszanie elektronów o przeciwnych spinach w przypadku antyrównoległego (a) i równoległego (b) namagnesowania warstw FM oraz odpowiadające im modele układu rezystorów (c, d).

W przypadku zamiany przekładki niemagnetycznej z metalicznej na cienką (~1 nm) przekładkę dielektryczną zachodzi zjawisko tunelowania elektronów przez barierę izolatora. W tym przypadku mamy do czynienia z efektem tunelowej magnetorezystancji (TMR – *Tunneling Magnetoresistance*). Struktury cienkowarstwowe wykazujące efekt TMR nazywane są magnetycznymi złączami tunelowymi. Podobnie jak w przypadku elementów GMR, wartość rezystancji elementu TMR zależy od wzajemnego ustawienia namagnesowań elektrod ferromagnetycznych. Ustawienie to można zmieniać zewnętrznym polem magnetycznym. Aby mogła być realizowana równoległa i antyrównoległa konfiguracja ustawienia namagnesowania elektrod ferromagnetycznych, ich przełączanie musi następować w polach o różnych wartościach. Można to zrealizować wytwarzając warstwy (elektrody) ferromagnetyczne o różnym polu koercji. Rysunek 2a przedstawia układ dwóch warstw ferromagnetycznych, gdzie warstwa o większej grubości ma większą koercję magnetyczną. Na rysunku 2b przedstawiona jest zależność namagnesowania układu od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. Warstwa dolna o większej grubości przełącza się w większym polu niż warstwa górna. Pozwala to na realizację stanu równoległego i antyrównoległego namagnesowania warstw ferromagnetycznych. Rysunek 2c przedstawia zależność rezystancji elementu od zewnętrznego pola. Rezystancja zmienia się w zależności od wzajemnego ustawienia kierunków namagnesowań warstw. Dla konfiguracji równoległej rezystancja jest znacznie mniejsza niż w przypadku konfiguracji antyrównoległej. Różnica rezystancji w konfiguracji antyrównoległej (R_{AR}) i równoległej (R_R) do rezystancji w konfiguracji równoległej definiuje wartość TMR:

$$TMR = \frac{R_{AR} - R_R}{R_R} \cdot 100\% \quad (2)$$

Wartości TMR mogą sięgać kilkuset procent w temperaturze pokojowej. Dla złącz z barierą MgO i elektrodami ferromagnetycznymi CoFeB TMR przekracza 600 %.

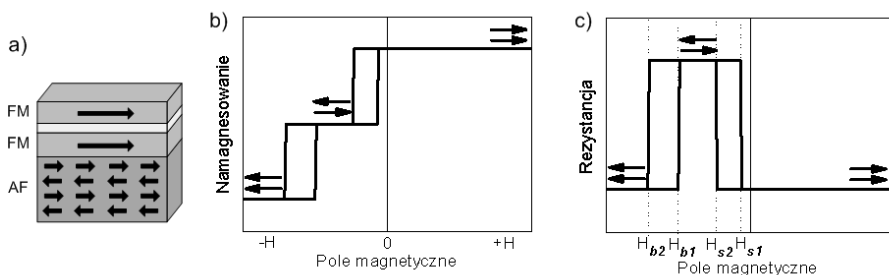


Rys. 2. Dwie warstwy ferromagnetyczne (FM) o różnej koercji przedzielone przekładką niemagnetyczną (a). Zależność namagnesowania od natężenia pola magnetycznego (b) i odpowiadająca jej zależność rezystancji (c).

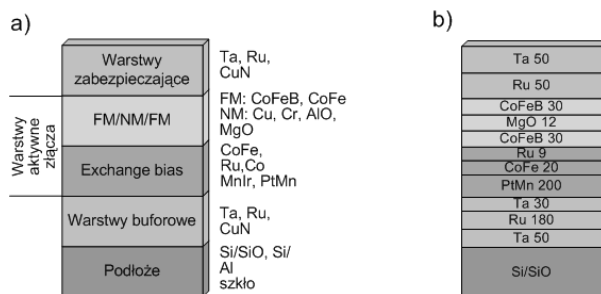
b) Zawór spinowy

Innym sposobem realizowania ustawień równoległych i antyrównoległych jest zastosowanie układów o strukturze typu zawór spinowy, gdzie kierunek namagnesowania jednej

z warstw ferromagnetycznych jest przytrzymany przez dodatkową warstwę antyferromagnetyczną. Na rysunku 3a przedstawiona jest struktura warstwowa elementu typu zawór spinowy. Pod dolną elektrodą ferromagnetyczną znajduje się dodatkowa warstwa z materiału antyferromagnetycznego (AF), która przytrzymuje kierunek namagnesowania warstwy ferromagnetycznej przylegającej do niej. W wyniku tego przełączanie zwrotu namagnesowania dolnej elektrody, tzw. warstwy zamocowanej, następuje w polu o wysokim ujemnym natężeniu, natomiast w otoczeniu pola $H=0$ zwrot namagnesowania tej warstwy jest ustalony. Druga warstwa ferromagnetyczna (elektroda górna), przełączająca się w polu o małym natężeniu, jest warstwą swobodną. Zależność namagnesowania od zewnętrznego pola jest pokazana na rysunku 3b. Na rysunku 3c pokazana jest zależność rezystancji od zewnętrznego pola magnetycznego, które powoduje zmianę wzajemnych ustawień zwrotów namagnesowań warstwy swobodnej i zamocowanej. Na rysunku zaznaczone są charakterystyczne pola przełączeń warstwy zamocowanej (oznaczone jako H_{b1} , H_{b2}) i swobodnej (H_{s1} , H_{s2}).



Rys. 3. Układ typu zawór spinowy (a) i odpowiadająca mu zależność namagnesowania (b) oraz rezystancji (c) od pola magnetycznego. Na wykresie (c) przedstawiono charakterystyczne pola przełączeń.



Rys. 4. Budowa struktury warstwowej zaworu spinowego (a) i praktyczna struktura złącza tunelowego (b) - grubości warstw w Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

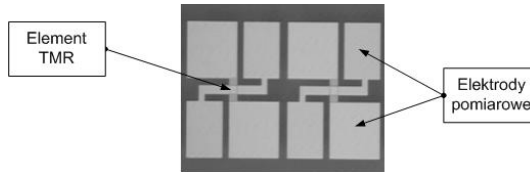
Rysunek 4a przedstawia budowę struktury warstwowej złącza tunelowego typu zawór spinowy wraz z najczęściej stosowanymi materiałami. Oprócz warstw aktywnych złącza, w skład struktury wchodzi:

- podłoże, na którym nanoszone są kolejne warstwy,
- warstwy buforowe, które wymuszają określony krystalograficznie wzrost warstw aktywnych złącza oraz stanowią dolną elektrodę doprowadzającą prąd do złącza,

- warstwy zabezpieczające, które chronią warstwy aktywne i są górną niemagnetyczną elektrodą doprowadzającą prąd do złącza.

Rysunek 4b przedstawia praktyczną strukturę warstwową złącza tunelowego do pomiaru podstawowych charakterystyk elektrycznych i magnetycznych.

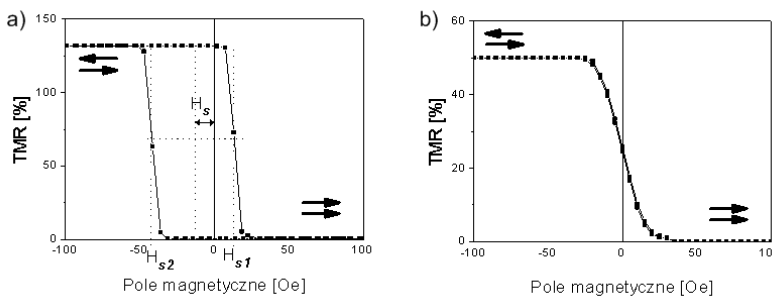
Rysunek 5 przedstawia widok elementów TMR z elektrodami pomiarowymi. Element TMR, o rozmiarach rzędu mikrometra, znajduje się na skrzyżowaniu pomiędzy elektrodami pomiarowymi.



Rys. 5. Widok elektrod doprowadzających prąd do elementu testowego TMR.

Rysunek 6a przedstawia przykładową zależność magnetorezystancji tunelowej od natężenia pola magnetycznego. Zwroty wektorów namagnesowań warstwy swobodnej i zamocowanej, dla stanów niskiej (R_R) i wysokiej (R_{AR}) rezystancji, zaznaczono strzałkami. W przypadku, gdy pętla jest prostokątna z polem koercji rzędu kilkudziesięciu Oe ($1 \text{ Oe} = 80 \text{ A/m}$), element taki może pracować jako komórka pamięci MRAM przełączająca się między stanami R i AR . W przypadku pola koercji bliskiego zera i liniowej zmiany rezystancji wokół pola zerowego (rys. 6b), element taki może służyć jako czujnik pola magnetycznego np. w głowicach odczytowych dysków twardych.

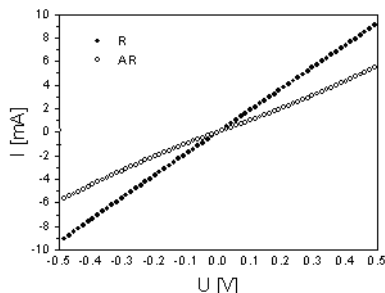
W przypadku czujnika ważnym parametrem jest jego czułość w zakresie liniowym, czyli stosunek zmiany rezystancji do zmiany natężenia pola magnetycznego.



Rys. 6. Prostokątna pętla TMR warstwy swobodnej (a). Bezkoercyjna (liniowa) charakterystyka TMR warstwy swobodnej (b).

Rysunek 7 przedstawia przykładową zależność prądu tunelowania od przyłożonego napięcia dla konfiguracji równoległej (R) i antyrównoległej (AR). Równoległą orientację

namagnesowań odpowiadającą małej rezystancji, bądź antyrównoległą odpowiadającą dużej rezystancji, wymusza się zewnętrznym polem magnetycznym (rys. 6).



Rys. 7. Zależność prądu tunelowania od napięcia dla stanu równoległego (R) i antyrównoległego (AR).

c) Parametry zaworu spinowego

Na podstawie pól przełączeń zdefiniowanych na rysunkach 3 i 6 wyznacza się parametry zaworu spinowego:

- H_S – sprzężenie pomiędzy warstwą zamocowaną a warstwą swobodną:

$$H_S = \frac{H_{s2} + H_{s1}}{2} \quad (3)$$

- H_{CF} – pole koercji warstwy swobodnej:

$$H_{CF} = \frac{|H_{s2} - H_{s1}|}{2} \quad (4)$$

- H_{EXB} – sprzężenie pomiędzy a warstwą zamocowaną a warstwą antyferromagnetyczną:

$$H_{EXB} = \frac{H_{b2} + H_{b1}}{2}. \quad (5)$$

Ad 2. Pomiary charakterystyk elektrycznych i magnetycznych elementów GMR i TMR

System do badania właściwości elementów magnetorezystancyjnych (GMR/TMR) jest podzielony na moduły. W skład modułu wytwarzania pola wchodzi źródło pola magnetycznego (cewki Helmholtza zasilane sterowanym źródłem prądu). Moduł elementu tworzą

testowe elementy GMR/TMR, wzmacniacz napięciowy oraz układy zasilania. Moduły konwersji, rejestracji i przetwarzania sygnału wyposażone są w kartę pomiarową i komputer. System pozwala badać właściwości elementów dla zadanych wartości natężenia pola magnetycznego.

a) Pomiary charakterystyk rezystancja-natężenie pola magnetycznego $R(H)$ elementów GMR i TMR

Do elektrod pomiarowych (rys. 5) wybranych elementów podłączyć głowice pomiarowe. Na elementach typu zawór spinowy wykonać wstępny pomiar charakterystyki $R(H)$ w celu dobrania maksymalnego pola i jego kroku. Wynik pomiaru powinien przypominać pętle przedstawione na rysunku 6. Wykonać pomiary charakterystyk $R(H)$ dla kilku napięć zasilania oraz kilku złącz o różnych rozmiarach.

b) Pomiary charakterystyk prąd-napięcie $I(V)$ elementów TMR

Dla złącz przebadanych w punkcie (a) wykonać pomiary charakterystyk $I(V)$ dla konfiguracji wysokiej (stan AR) i niskiej (R) rezystancji (rys. 7). Nie przekraczać napięcia przebicia złącza TMR (około 1.5 V).

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, elementy oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.

Wykaz aparatury

1. Multimetr/karta pomiarowa,
2. Elementy GMR i TMR,
3. Zasilacz,
4. Cewki Helmholtza generujące pole magnetyczne.

Ćwiczenie 2

Komercyjne czujniki magnetorezystancyjne typu: AMR, GMR i TMR - pomiary charakterystyk

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania czujników AMR/GMR/TMR. Pomiary podstawowych charakterystyk elektrycznych i magnetycznych czujników magnetorezystancyjnych.

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach AMR,
 - b. Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach GMR,
 - c. Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach TMR.
2. Pomiary charakterystyk czujników i elementów magnetorezystancyjnych
 - a. Pomiary czujników AMR,
 - b. Pomiary czujników GMR,
 - c. Pomiary czujników TMR.

Zakres wymaganych wiadomości

Efekt anizotropowej magnetorezystancji AMR, efekt gigantycznej magnetorezystancji GMR, efekt tunelowej magnetorezystancji TMR, zasada działania czujników magnetorezystancyjnych AMR/GMR/TMR, krzywa przetwarzania – napięcie w funkcji natężenia pola magnetycznego, zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowości, histereza, kalibracja czujnika.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magneto rezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.
- [3] Noty katalogowe czujników AMR firmy Honeywell.
- [4] Noty katalogowe czujników GMR firmy NVE.
- [5] Noty katalogowe czujników TMR firmy NVE.

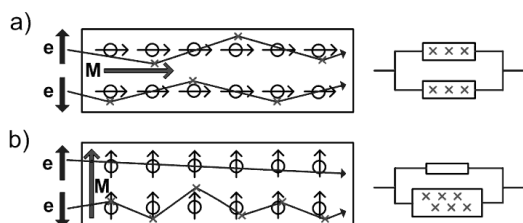
Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

a) Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach AMR

Najprostszymi elementami magnetorezystancyjnymi są cienkie warstwy ferromagnetyczne, które wykazują anizotropowy efekt magnetorezystancyjny (AMR – *Anisotropic Magnetoresistance*). Rezystancja takiej warstwy jest zależna od kąta pomiędzy jej namagnesowaniem a kierunkiem przepływu prądu. Rysunek 1 przedstawia w schematyczny sposób różnicę w rozpraszaniu elektronów w warstwie ferromagnetycznej. W przypadku namagnesowania (M) warstwy równoległego do kierunku przepływu prądu (rys. 1a), rozpraszanie następuje jednakowo dla elektronów przewodnictwa o spinach skierowanych w górę jak i w dół (przy założeniu tylko spinowo zależnego rozpraszania elektronów przewodnictwa). W przypadku namagnesowania prostopadłego do kierunku przepływu prądu (rys. 1b) elektrony o spinach w górę (których zwrot jest zgodny ze zwrotem namagnesowania warstwy) nie są rozpraszane, natomiast elektrony o spinach w dół są rozpraszane. Wywołuje to różnicę dróg swobodnych elektronów rozpraszanych dwukanałowo w zależności od orientacji spinu, co powoduje powstanie efektu magnetorezystancyjnego.

Obie sytuacje można przybliżyć za pomocą układu rezystorów połączonych równolegle, które przedstawiają schematy po prawej stronie rysunku 1 (większemu rezystorowi odpowiada większa rezystancja). W przypadku (b) rezystancja zastępcza jest mniejsza niż w przypadku (a). Gdy kierunek namagnesowania i prąd nie są do siebie równoległe lub prostopadłe, rezystancja warstwy wykazuje wartości pośrednie, a względna zmiana rezystancji $\Delta R/R$ zależy od kąta między kierunkiem wektora namagnesowania a kierunkiem przepływu prądu.



Rys. 1. Rozpraszanie elektronów o przeciwnych spinach dla warstwy namagnesowanej równoległe (a) i prostopadłe (b) do wektora gęstości prądu oraz odpowiadający im zastępczy model układu rezystorów.

Elementy magnetorezystancyjne w czujnikach wykonywane są zwykle w postaci pasków zbudowanych z cienkich warstw ferromagnetycznych, o grubości od kilku do kilkadziesiąt nanometrów, namagnesowanych wzdłuż paska (rys. 2a). Ze względu na indukowaną anizotropię w procesie nanoszenia i anizotropię odnamagnesowania, namagnesowanie

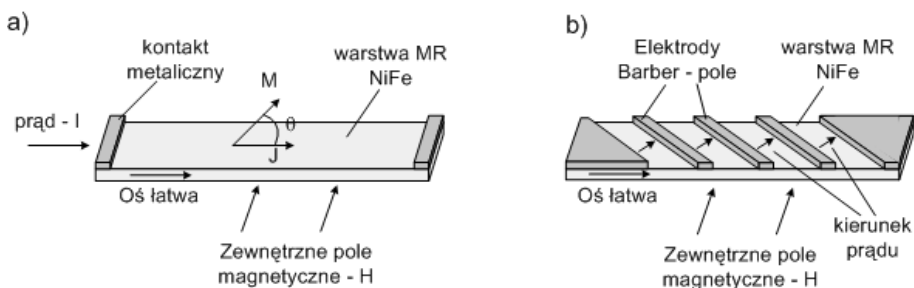
warstwy w zerowym polu magnetycznym jest skierowane w jednym preferowanym kierunku, który nazywany jest osią łatwą (rys. 2a). W przypadku podłużnego paska oś łatwego namagnesowania jest indukowana wzdłuż dłuższego boku, gdyż kierunek ten pokrywa się z kierunkiem odnamagnesowania.

Rezystancja paska ferromagnetycznego jest zależna od kąta pomiędzy kierunkami namagnesowania \mathbf{M} i gęstości prądu \mathbf{J} . Kierunek namagnesowania paska można zmieniać zewnętrznym polem magnetycznym. Zmiana kierunku namagnesowania powoduje zmianę rezystancji. Zależność tę opisuje równanie:

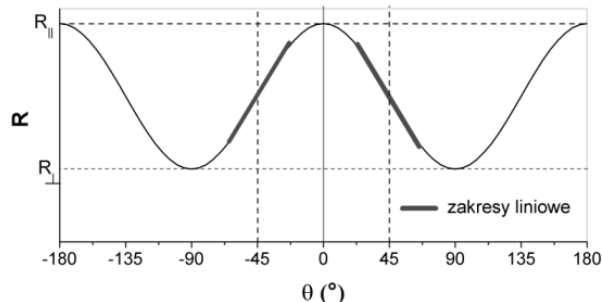
$$R(\theta) = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2(\theta) \quad (1)$$

gdzie θ jest kątem pomiędzy wektorem namagnesowania (\mathbf{M}) oraz wektorem gęstości prądu (\mathbf{J}) (rys. 2a). Rezystancja paska jest największa dla równoległego ustawienia kierunku prądu i wektora namagnesowania (R_{\parallel}), a najmniejsza w przypadku ustawienia prostopadłego (R_{\perp}) (rys. 3).

W praktyce wykorzystuje się warstwy magnetorezystancyjne z dodatkowymi elektrodami wykonanymi z dobrze przewodzącego materiału (np. Au, Al, Cu) (rys. 2b). Jest to element AMR typu *Barber-pole*, w którym te dodatkowe elektrody wymuszają przepływ prądu pod kątem 45° do kierunku osi łatwej paska ferromagnetycznego. Pozwala to na linearyzację zależności rezystancji od pola magnetycznego, wokół pola zerowego.



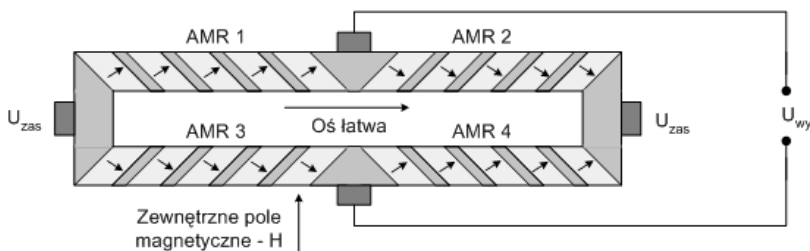
Rys. 2. Pasek magnetorezystancyjny (a) i element AMR typu *Barber-pole* (b).



Rys. 3. Zależność rezystancji paska ferromagnetycznego od kąta pomiędzy kierunkiem prądu, a namagnesowaniem.

Rysunek 3 przedstawia zależność rezystancji paska ferromagnetycznego od kąta pomiędzy kierunkiem prądu a namagnesowaniem, otrzymaną na podstawie wzoru 1. Zaznaczono przybliżone zakresy liniowe czujnika, które wykorzystuje się w pomiarach pola magnetycznego.

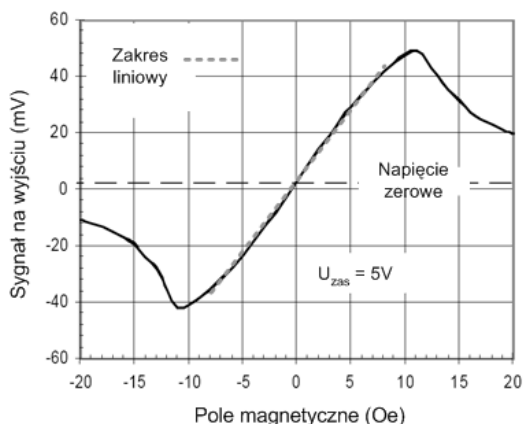
Elementy AMR w czujnikach zwykle tworzą układ mostkowy. Na rysunku 4 przedstawiony jest układ czterech elementów AMR połączonych w mostek. Napięcie U_{zas} przyłożone do mostka powoduje przepływ prądu przez elementy AMR. Bez zewnętrznego pola rezystancja wszystkich elementów powinna być jednakowa, a więc U_{wy} powinno być równe zero. Przyłożenie zewnętrznego pola powoduje obrót namagnesowania i wzrost rezystancji w dwóch elementach mostka oraz spadek w dwóch pozostałych, co powoduje pojawienie się napięcia U_{wy} . W liniowym zakresie pracy mostka zmiana napięcia wyjściowego jest proporcjonalna do zewnętrznego pola (rys. 5).



Rys. 4. Czujnik oparty na elementach AMR połączonych w konfiguracji mostkowej.

Napięcie na wyjściu takiego nieobciążonego prądowo mostka wynosi:

$$U_{wy} = \left(\frac{R_{AMR1}}{R_{AMR1} + R_{AMR2}} - \frac{R_{AMR3}}{R_{AMR3} + R_{AMR4}} \right) U_{zas} \quad (2)$$



Rys. 5. Krzywa przetwarzania czujnika AMR firmy Honeywell z zaznaczonym przybliżonym zakresem liniowym (1 Oe = 80 A/m).

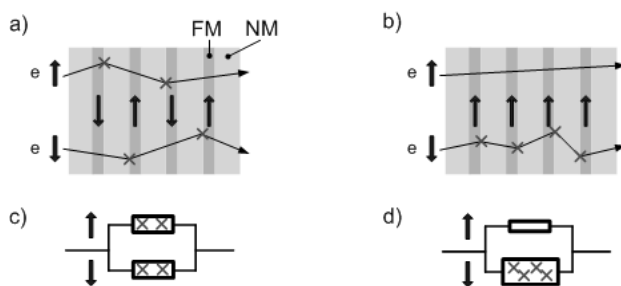
Rysunek 5 przedstawia odpowiedź czujnika AMR na przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne. Linia przerywaną zaznaczono przybliżony zakres liniowej zmiany napięcia wyjściowego od pola magnetycznego.

Z charakterystyki przetwarzania można określić następujące parametry:

- **zakres pomiarowy pola** – jest to zakres, w którym charakterystyka $U_{wy}(H)$ jest liniowa z określonym błędem liniowości,
- **czułość** – jest to nachylenie charakterystyki przetwarzania ($\Delta U_{wy}/\Delta H$) czujnika w zakresie małych pól,
- **błąd liniowości** – procentowe odchylenie wartości pomiarowych od linii prostej o współczynniku nachylenia określonym przez czułość,
- **rozdzielczość** – jest to najmniejsza zmiana pola, która powoduje wykrywalną zmianę napięcia U_{wy} ,
- **napięcie zerowe** – niezerowa wartość U_{wy} dla zerowego pola, która powoduje przesunięcie charakterystyki przetwarzania,
- **histereza** – różna wartość U_{wy} dla tego samego pola w zależności od kierunku zmiany pola.

b) Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach GMR

Efekt gigantycznej magnetorezystancji (GMR - *Giant Magnetoresistance*) występuje w cienkowarstwowej strukturze wielowarstwowej, składającej się z warstw ferromagnetycznych (FM) rozdzielonych przekładką niemagnetyczną (NM). W zależności od wzajemnego kierunku namagnesowania warstw FM, układ wykazuje stan niskiej lub wysokiej rezystancji. Podobnie jak w przypadku AMR efekt ten można wyjaśnić za pomocą modelu dwukanałowego rozpraszania elektronów. Dla antyrównoległego namagnesowania warstw (rys. 6a) rozpraszanie elektronów o spinach skierowanych w górę jest takie samo jak dla elektronów o spinach w dół. Ustawienie równoległe namagnesowań (rys. 6b) powoduje zmniejszenie rozpraszania dla elektronów o spinach skierowanych w górę i wzrost dla elektronów o spinach w dół. Można to przedstawić za pomocą układu rezystorów. Dla układu jak na rysunku 6c rezystancja zastępcza jest większa niż dla układu przedstawionego na rysunku 6d.



Rys. 6. Warstwy ferromagnetyczne (FM) przedzielone niemagnetyczną przekładką metaliczną (NM). Rozpraszanie elektronów o przeciwnych spinach w przypadku antyrównoległego (a) i równoległego (b) namagnesowania warstw FM oraz odpowiadające im modele rezystorowe (c, d).

Wartość parametru GMR dla takiego układu określa wzór:

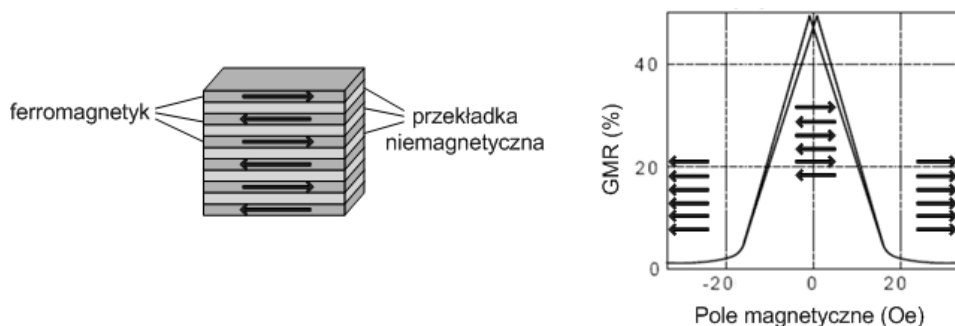
$$GMR = \frac{R_{AR} - R_R}{R_R} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie R_{AR} i R_R są odpowiednio rezystancjami dla antyrównoległego i równoległego ustawienia warstw. GMR może osiągać wartości rzędu kilkudziesięciu procent.

W elementach GMR zmiana rezystancji zachodzi, gdy zmienia się różnica kątów (θ_1 i θ_2) między namagnesowaniami sąsiednich warstw ferromagnetycznych:

$$R = R_R + \frac{R_{AR} - R_R}{2} (1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)) \quad (4)$$

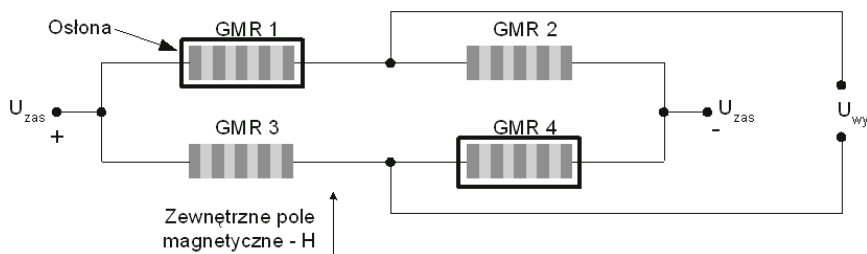
Na rysunku 7 przedstawiona została przykładowa zależność GMR od pola magnetycznego dla układu warstw sprzężonych antyferromagnetycznie (zwroty namagnesowań sąsiednich warstw ferromagnetycznych są przeciwne). W takim przypadku rezystancja elementu GMR jest największa. W wyniku działania zewnętrznego pola następuje obrót zwrotu namagnesowań w kierunku pola. W dostatecznie dużym polu wszystkie warstwy ferromagnetyczne namagnesowane są zgodnie z kierunkiem pola, a opór elementu jest najmniejszy.



Rys. 7. Charakterystyka $\Delta R/R$ dla elementu GMR w funkcji przyłożonego pola.

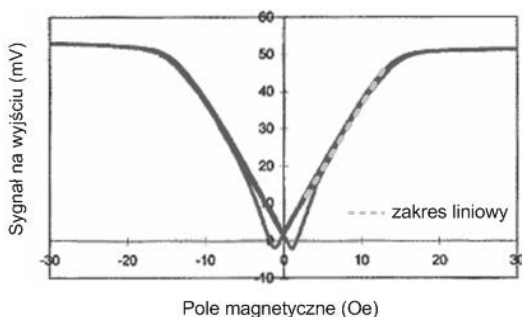
W przypadku układów składających się z kilku/kilkudziesięciu warstw wartość GMR może sięgać kilkudziesięciu procent, jednak wymagane jest dość duże pole do zmiany konfiguracji układu z antyrównoległej do równoległej. Do detekcji małych pól można stosować elementy GMR złożone tylko z dwóch warstw ferromagnetycznych. W elementach tych, w zewnętrznym polu magnetycznym o małym natężeniu, przełącza się tylko jedna warstwa ferromagnetyczna (tzw. warstwa swobodna). Druga warstwa (tzw. warstwa zamocowana) przemagnesowuje się w dużym polu. Układy takie mają niższą wartość GMR, lecz dzięki mniejszym polom przełączeń mogą mieć większą czułość, czyli większy stosunek zmiany rezystancji do przyłożonego pola.

Czujniki GMR do pomiaru pola magnetycznego, podobnie jak czujniki AMR, składają się najczęściej z czterech elementów połączonych w konfiguracji mostkowej (rys. 8). Dwa elementy mostka (GMR 1 i GMR 4) są izolowane osłonami przed zewnętrznym polem magnetycznym. Pod działaniem pola tylko elementy GMR 2 i GMR 3 zmieniają rezystancję. Powoduje to powstanie napięcia U_{wy} w zależności od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 8. Schemat mostkowy czujnika złożonego z elementów GMR.

Rysunek 9 przedstawia charakterystykę przetwarzania czujnika GMR. Liniją przerywaną zaznaczono przykładowy zakres liniowy sygnału na wyjściu w zależności od pola magnetycznego. Czujniki oparte na elementach GMR typu wielowarstwa wykazują omni-polarną charakterystykę $R(H)$, tzn. rezystancja elementu nie zależy od zwrotu zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 9. Charakterystyka przetwarzania czujnika GMR firmy NVE (1 Oe = 80 A/m).

Z charakterystyki przetwarzania można określić następujące parametry:

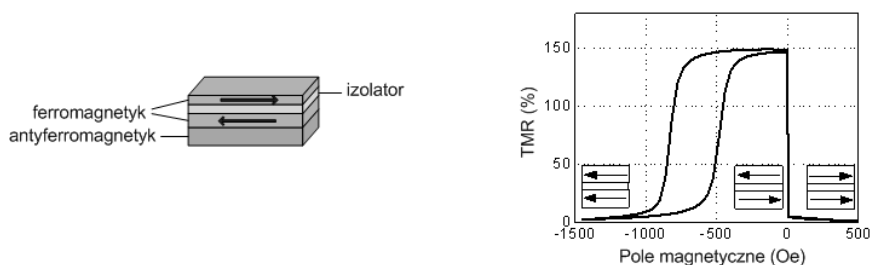
- **zakres pomiarowy pola** – jest to zakres, w którym charakterystyka $U_{wy}(H)$ jest liniowa z określonym błędem liniowości,
- **czułość** – jest to nachylenie charakterystyki przetwarzania ($\Delta U_{wy}/\Delta H$) czujnika w zakresie małych pól,
- **błąd liniowości** – procentowe odchylenie wartości pomiarowych od linii prostej o współczynniku nachylenia określonym przez czułość,

- **rozdzielczość** – jest to najmniejsza zmiana pola, która powoduje wykrywalną zmianę napięcia U_{wy} ,
- **napięcie zerowe** – niezerowa wartość U_{wy} dla zerowego pola, która powoduje przesunięcie charakterystyki przetwarzania,
- **histereza** – różna wartość U_{wy} dla tego samego pola w zależności od kierunku zmiany pola.

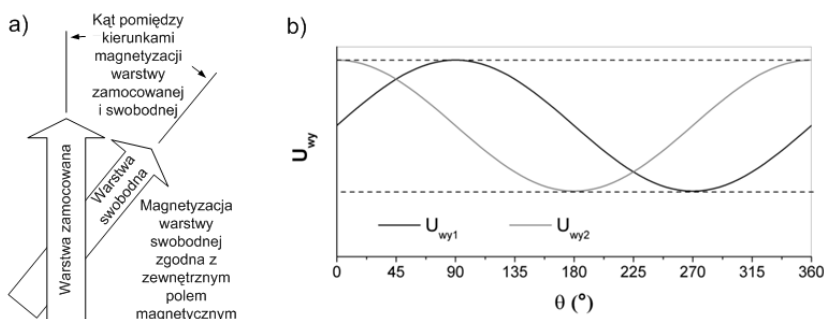
c) Czujniki magnetorezystancyjne oparte na elementach TMR

W przypadku tunelowej magnetorezystancji (TMR - *Tunneling Magnetoresistance*) dwie warstwy ferromagnetyczne rozdzielone są warstwą izolatora stanowiącą barierę, przez którą następuje, zależny od kierunku spinu elektronu, efekt tunelowania. Wartość TMR może przekraczać 600 % dla złącza z barierą MgO i elektrodami ferromagnetycznymi Co-FeB. Rysunek 10 przedstawia schematycznie strukturę złącza i odpowiadającą jej zależność tunelowej magnetorezystancji od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, gdzie wartość TMR określona jest wzorem (5).

$$TMR = \frac{R_{AR} - R_R}{R_R} \cdot 100\% \quad (5)$$



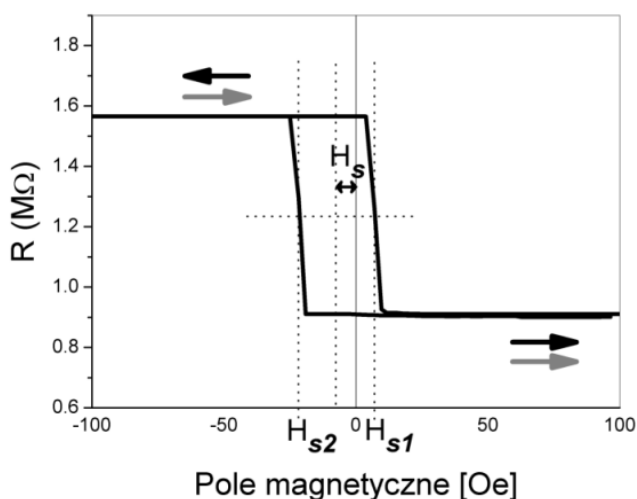
Rys. 10. Charakterystyka $\Delta R/R$ dla elementu TMR w funkcji przyłożonego pola.



Rys. 11. Zasada działania elementów TMR w czujnikach kąta (a). Charakterystyka przetwarzania dla elementu TMR firmy NVE w funkcji kąta przyłożonego pola (b).

Czujniki kąta firmy NVE oparte są na układach TMR połączonych w konfiguracji półmostkowej. Zewnętrzne pole magnetyczne o wartości od 2.4 kA/m do 16 kA/m (od 30 do 200 Oe) powoduje zmianę kierunku namagnesowania warstwy swobodnej zgodnie z polem, podczas gdy kierunek namagnesowania warstwy zamocowanej jest stały (rys. 11a). W konsekwencji daje to zmianę napięcia wyjściowego od kąta pomiędzy zewnętrznym polem a kierunkiem warstwy zamocowanej (rys. 11b). Czujnik posiada dwa wyjścia, na których napięcie jest proporcjonalne do sinusa i cosinusa kąta, jaki tworzy zewnętrzne pole magnetyczne z kierunkiem namagnesowania warstwy zamocowanej.

Jeżeli kierunek zewnętrznego pola magnetycznego będzie zgodny z kierunkiem osi ławej elementu TMR, to wynikiem pomiaru rezystancji w funkcji natężenia pola magnetycznego będzie pętla histerezy, podobna do przedstawionej na rysunku 12. Dla wartości pól powyżej 30 Oe (2.4 kA/m) warstwa swobodna nasyci się i ustawia zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola, co jest warunkiem prawidłowego działania czujnika przy pomiarze kąta.



Rys. 12. Zależność rezystancji od wartości natężenia pola magnetycznego dla elementu TMR.

Na podstawie pól przełączeń zdefiniowanych na rysunku 12 można wyznaczyć parametry sprzężeń magnetycznych zaworu spinowego TMR:

- H_s – sprzężenie pomiędzy warstwą zamocowaną a warstwą swobodną:

$$H_s = \frac{H_{s2} + H_{s1}}{2} \quad (6)$$

- H_{CF} – pole koercji warstwy swobodnej:

$$H_{CF} = \frac{|H_{s2} - H_{s1}|}{2}. \quad (7)$$

Ad 2 Pomiary charakterystyk czujników i elementów magnetorezystancyjnych

System do badania właściwości czujników (AMR/GMR/TMR) jest podzielony na moduły. W skład modułu wytwarzania pola wchodzi źródło pola magnetycznego (cewki Helmholtza zasilane sterowanym źródłem prądu). Moduł czujnika, na który składa się czujnik AMR/GMR/TMR, wzmacniacz napięciowy oraz układy zasilania. Moduły konwersji, rejestracji i przetwarzania sygnału wyposażone są w kartę pomiarową i komputer. System pozwala badać właściwości pomiarowe czujników (charakterystyki przetwarzania) dla zadanych wartości natężenia pola magnetycznego.

a) Pomiary czujników AMR

Podłączyć czujnik AMR do układu i wykonać pomiary napięcia wyjściowego w funkcji natężenia pola magnetycznego $U_{wy}(H)$.

Podłączyć wybrany element AMR i wykonać pomiar $U_{wy}(H)$.

Wynik pomiaru powinien przypominać pętle przedstawione na rysunku 5.

b) Pomiary czujników GMR

Podłączyć czujnik GMR do układu i wykonać pomiary napięcia wyjściowego w funkcji natężenia pola magnetycznego $U_{wy}(H)$.

Podłączyć wybrany element GMR i wykonać pomiar $U_{wy}(H)$.

Wynik pomiaru powinien przypominać pętle przedstawione na rysunkach 7 i 9.

c) Pomiary czujników TMR

Podłączyć czujnik TMR do układu i wykonać pomiary napięcia wyjściowego w funkcji natężenia pola magnetycznego $U_{wy}(H)$.

Podłączyć wybrany element TMR i wykonać pomiar $U_{wy}(H)$.

Wynik pomiaru powinien przypominać pętle przedstawione na rysunkach 10 i 12.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, czujniki oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.

Wykaz aparatury

1. Multimetr/karta pomiarowa,
2. Czujniki AMR, GMR i TMR,
3. Zasilacz,
4. Cewki Helmholtza generujące pole magnetyczne.

Ćwiczenie 3

Pomiary pola magnetycznego z użyciem czujnika AMR/GMR

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości i możliwości pomiarowych czujników pola magnetycznego, zbudowanych w oparciu o elementy spintroniczne, wykazujące efekt anizotropowej magnetorezystancji (AMR) i gigantycznej magnetorezystancji (GMR).

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Pole magnetyczne i jego źródła,
 - b. Czujniki wykorzystujące efekt anizotropowej magnetorezystancji,
 - c. Czujniki wykorzystujące efekt gigantycznej magnetorezystancji ,
 - d. Czujniki AMR i GMR w pomiarach pola magnetycznego.
2. Pomiar pola magnetycznego z użyciem czujników AMR i GMR
 - a. Badanie właściwości pomiarowych czujników,
 - b. Pomiar natężenia pola magnetycznego.

Zakres wymaganych wiadomości

Rodzaje pola magnetycznego, jego źródła i jednostki. Zasada działania i budowa czujników AMR i GMR pracujących w konfiguracji mostkowej. Pojęcia krzywej przetwarzania, czułości, rozdzielczości, liniowości, histerezy i napięcia zerowego. Właściwości pomiarowe czujników AMR i GMR w pomiarach stałego i przemiennego pola magnetycznego.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.
- [3] Noty katalogowe czujników AMR firmy Honeywell i GMR firmy NVE.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

a) Pole magnetyczne i jego źródła

Pole magnetyczne definiuje się jako stan przestrzeni, w której działają siły na poruszające się ładunki elektryczne, a także na ciała posiadające moment magnetyczny, niezależnie od ich ruchu. Siła oddziaływania zależy zarówno od wartości pola jak i jego kierunku. Ponieważ pole magnetyczne jest wielkością wektorową, w jego opisie podaje się wartość oraz kierunek i zwrot. Jednostką natężenia pola magnetycznego (H), w układzie SI, jest amper na metr (A/m). Z polem magnetycznym związana jest indukcja pola magnetycznego (B), której jednostką jest Tesla (T). Źródła pola magnetycznego dzieli się na źródła naturalne i techniczne. Do naturalnych źródeł pola zaliczamy kulę ziemską oraz organizmy żywe. Pola wytwarzane przez różnego rodzaju urządzenia elektryczne (np. transformatory, silniki elektryczne) oraz magnesy trwałe i elektromagnesy, nazywamy technicznymi źródłami pola. Zakres wartości pola magnetycznego wytwarzanego przez wybrane źródła pola przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Wartości indukcji pola magnetycznego wytwarzane przez wybrane źródła

Źródło pola	Zakres wartości	Rodzaj pola
Kula ziemską	0.03mT – 0.06mT	Stałe
Serce człowieka Mózg człowieka	50×10^{-3} nT 1×10^{-3} nT	Stałe
Urządzenia elektryczne	10^{-5} T – 1 T	Zmienne
Magnesy trwałe elektromagnesy	1 – 100 T	Stałe/Zmienne

Wymienione źródła wytwarzają pole magnetyczne stałe i zmienne. Jak widać w tabeli zakres wartości pola magnetycznego, który może być konieczny do pomiaru lub detekcji, jest bardzo szeroki. Stąd w zależności od zakresu, rodzaju mierzonego pola i celu pomiaru stosuje się techniki pomiaru wykorzystujące różnego typu czujniki pola magnetycznego: indukcyjne, hallowskie SQUID, (Superconducting Quantum Interference Device) i magnetorezystancyjne. Przedmiotem badań w ćwiczeniu są czujniki magnetorezystancyjne pozwalające mierzyć stałe i zmienne pole magnetyczne w zakresie od kilkuset nT do kilkudziesięciu mT.

b) Czujniki wykorzystujące efekt anizotropowej magnetorezystancji

Efekt anizotropowej magnetorezystancji polega na zmianie rezystancji przewodnika ferromagnetycznego (np. cienka warstwa ze stopu NiFe) w wyniku zmiany kąta między kierunkiem wektora namagnesowania ferromagnetyka \mathbf{M} , a kierunkiem wektora gęstości prądu \mathbf{J} (rys. 1a). Rezystancja ferromagnetyka jest największa, gdy kierunki gęstości i namagnesowania są równoległe (R_{\parallel}), a najmniejsza, gdy prostopadłe (R_{\perp}). Zależność rezystancji ferromagnetyka od kąta θ między kierunkiem namagnesowania, a kierunkiem prądu opisuje równanie:

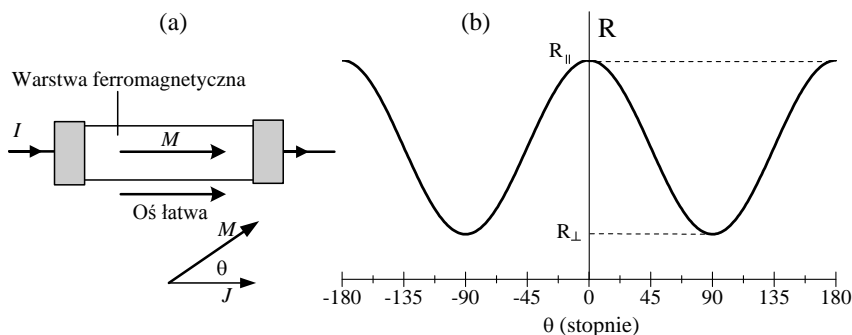
$$R(\theta) = R_{\perp} + \Delta R \cos^2(\theta) \quad (1)$$

Wartość zmiany tej rezystancji, $\Delta R = R_{\parallel} - R_{\perp}$ może dochodzić do kilku procent. Element wykazujący efekt AMR jest cienka warstwa (grubości 20-200 nm) ferromagnetyka, która wykazuje anizotropię kierunku namagnesowania. Anizotropia ta powoduje, że namagnesowanie ferromagnetyka skierowane jest w pewnym preferowanym kierunku, nazywanym osią łatwą (rys. 1a). Ponieważ mamy do czynienia z materiałem ferromagnetycznym, zmianę jego kierunku namagnesowania można zrealizować przez poddanie elementu działaniu zewnętrznego pola magnetycznego, które powoduje zmianę kąta θ , a w konsekwencji zmianę rezystancji elementu (rys. 1b). W zależności od kierunku przyłożonego pola względem kierunku namagnesowania, charakterystyka rezystancja od pola (R - H) elementu AMR może wykazywać różne kształty. Aby element AMR mógł pracować jako czujnik pola magnetycznego konieczne jest, by jego charakterystykę R - H cechowała liniowość, a ponadto symetria względem zera pola magnetycznego. Własność taką można osiągnąć, jeśli w zerowym polu kąt między prądem a namagnesowaniem będzie wynosił 45° . W praktyce uzyskuje się taką konfigurację przez wymuszenie przepływu prądu w ferromagnetyku pod kątem 45° do kierunku jego namagnesowania. Wymuszenie to realizuje się przez wykonanie na cienkiej warstwie ferromagnetycznej pasków z materiału o wysokiej przewodności (przewodność znacznie większa od przewodności ferromagnetyka), ułożonych pod kątem 45° do osi łatwej ferromagnetyka (rys. 2a). W takiej konfiguracji dominująca część prądu ferromagnetyka płynie pod kątem 45° w stosunku do osi łatwej (kierunku namagnesowania). Przyłożenie pola o odpowiedniej wartości w kierunku prostopadłym do kierunku namagnesowania elementu AMR (rys. 2a) zmienia ten kąt w granicach od 0° do 90° , co skutkuje zmianą rezystancji elementu przedstawioną na rys. 2b. Metoda ta pozwala uzyskać elementy o linowych charakterystykach R - H i jest najczęściej stosowana w praktyce.

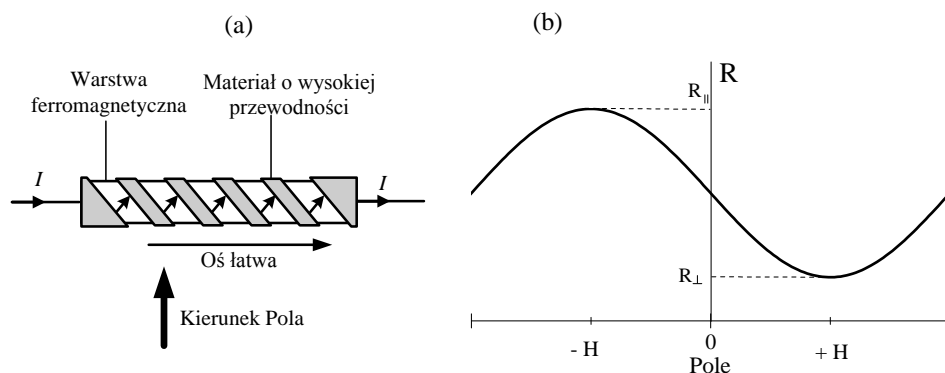
Budowa i zasada działania czujników AMR

Czujniki AMR do pomiaru pola magnetycznego zbudowane są najczęściej z czterech elementów pracujących w konfiguracji mostkowej (rys. 3a). Elementy mostka są tak wytwarzane, aby posiadały nominalnie takie same rezystancje. W zerowym polu, przy przepływie prądu przez mostek, elementy mostka wykazują takie same rezystancje, równe $(R_{\parallel} - R_{\perp})/2$ (rys. 1), ponieważ dla elementów AMR1 i AMR4 kąt $\theta = 45^\circ$, a dla elementów AMR2 i AMR3 kąt $\theta = -45^\circ$. Jeśli zostanie przyłożone zewnątrz pole magnetyczne zgodne z kierunkiem czułym czujnika (rys. 3a), to spowoduje ono zmianę kąta między kierun-

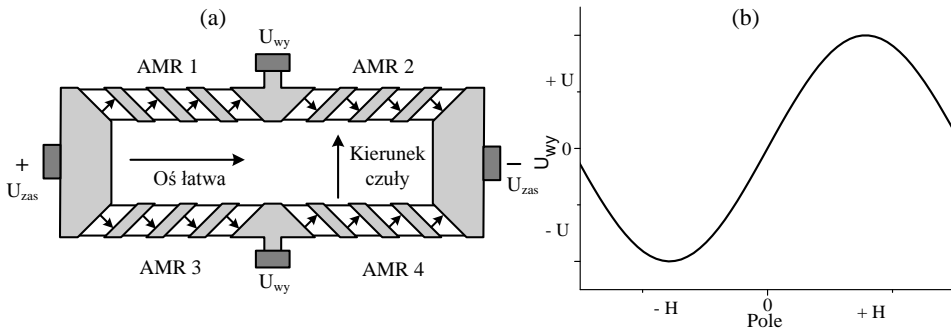
kiem namagnesowań elementów, a kierunkami prądu, co w konsekwencji doprowadzi do zmiany rezystancji elementów mostka. W wyniku zmian tych rezystancji pojawi się napięcie U_{wy} na wyprowadzeniach wyjściowych mostka, którego zmianę w funkcji pola przedstawia krzywa na rys. 3b. Na podstawie takiej charakterystyki można określić istotne właściwości pomiarowe i parametry danego czujnika takie jak: zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowość, histereza, napięcie zerowe.



Rys. 1. Warstwa ferromagnetyczna z namagnesowaniem skierowanym wzdłuż osi łatwej (a) oraz zależność jej rezystancji od kąta między kierunkiem namagnesowania a kierunkiem prądu przez nią przepływającym (b).



Rys. 2. Linearyzacja elementu AMR przez wymuszenie przepływu prądu po kącie 45° do osi łatwej ferromagnetyka (a). Zmiana rezystancji elementu AMR w funkcji pola magnetycznego przyłożonego w kierunku prostopadłym do jego osi łatwej (b).



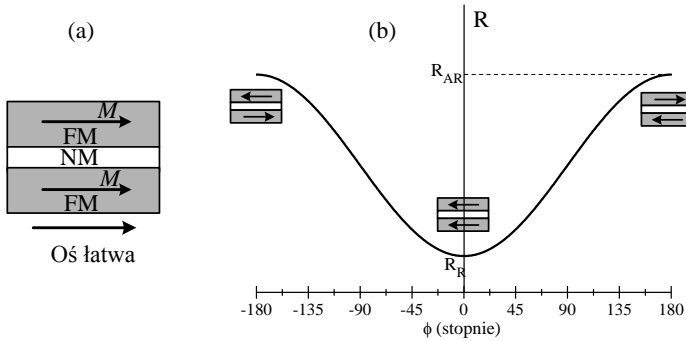
Rys. 3. Budowa czujnika AMR z elementów z wymuszonym przepływem prądu po kątem 45° do ich osi łatwej (a) oraz jego wyidealizowana charakterystyka przetwarzania (b).

c) Czujniki wykorzystujące efekt gigantycznej magneto rezystancji

Efekt gigantycznej magneto rezystancji obserwuje się w cienkowarstwowych układach (grubości nanometrowe), w których dwa materiały ferromagnetyczne (FM) przedzielone są niemagnetycznym materiałem przewodzącym (NM) (rys. 4a). Rezystancja takiego układu zależy od ułożenia kierunków namagnesowań ferromagnetyków i jest najmniejsza (R_R), gdy kierunki namagnesowań ferromagnetyków są równoległe, a największa, gdy kierunki namagnesowań są antyrównoległe (R_{AR}) (rys. 4b). Definiując ϕ jako kąt między kierunkami namagnesowań ferromagnetyków, rezystancję układu GMR można opisać równaniem:

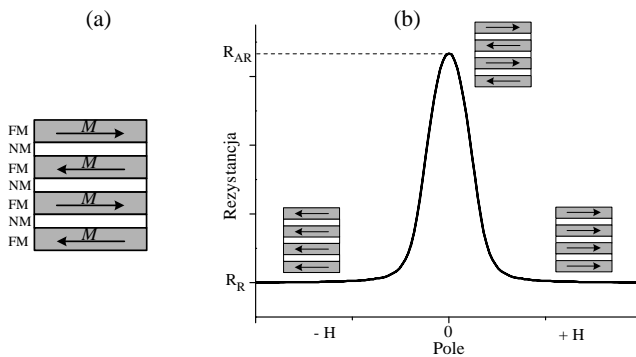
$$R(\phi) = R_R + \left(\frac{R_{AR} - R_R}{2} \right) [1 - \cos(\phi)] \quad (2)$$

Dla układu GMR definiuje się gigantyczną magneto rezystancję $GMR = (R_{AR} - R_R) / R_R$ 100 %, która osiąga wartości do kilkunastu procent w praktycznych układach. Elementy GMR w zależności od ich własności magnetycznych mogą wykazywać skokowe lub monotoniczne przejście między rezystancjami R_R i R_{AR} . Zmianę rezystancji elementu wymusza się przez poddanie go działaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Elementy wykazujące skokowe zmiany rezystancji nie nadają się do pomiaru pola ze względu na histerezę charakterystyki $R-H$. W celu użycia elementu GMR do budowy czujnika pola magnetycznego konieczne jest by jego charakterystyka $R-H$ nie wykazywała histerezy, była linowa a ponadto symetryczna względem zera pola magnetycznego. W celu uzyskania elementu o takich właściwościach wykorzystuje się metodę anizotropii prostopadłych lub sprzężenia antyferromagnetycznego między ferromagnetykami w strukturze wielowarstwowej. W metodzie anizotropii, wymusza się wzajemnie prostopadłe ułożenie namagnesowań M ferromagnetyków (kąt $\phi = 90^\circ$) w warunkach, gdy na element nie działa pole magnetyczne.



Rys. 4. Struktura warstwowa wykazująca efekt GMR (a) oraz zależność jej rezystancji od kąta między kierunkami namagnesowania ferromagnetyków (b).

Dla takiej konfiguracji rezystancja elementu wynosi $(R_{AR}+R_R)/2$. Natomiast, gdy przyłożone pole wywołuje zmianę kąta ϕ od 0° do 180° , to zgodnie z równaniem (2) uzyskuje się zmianę rezystancji od R_R do R_{AR} . W drugiej metodzie wykorzystuje się fakt występowania silnego sprzężenia antyferromagnetycznego między warstwami ferromagnetycznymi (FM) w strukturze wielowarstwowej (rys. 5a). Sprzężenie to powoduje, że w zerowym polu kierunki namagnesowań ferromagnetyków są antrywnoległe (rys. 5b). Struktura wielowarstwowa wykazująca sprzężenia antyferromagnetyczne osiąga maksymalną rezystancję R_{AR} w $H=0$ (rys. 5b). Ze wzrostem wartości pola, warstwy o przeciwnie skierowanych do pola namagnesowaniach, zmieniają kierunki do osiągnięcia konfiguracji, w której ich namagnesowania będą skierowane zgodnie z kierunkiem działającego pola. W takiej konfiguracji rezystancja elementu jest minimalna R_R .



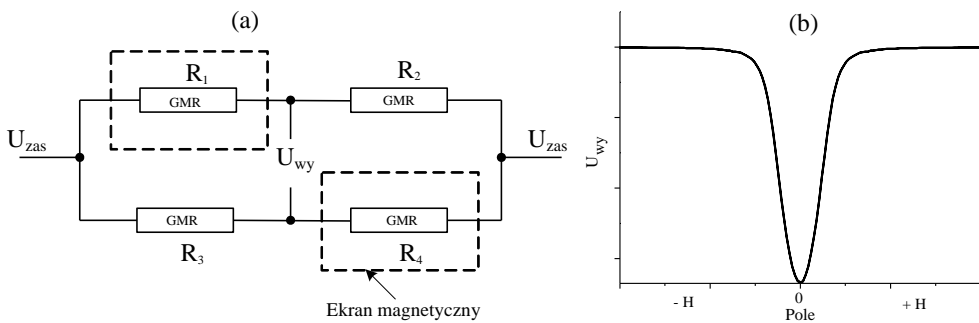
Rys. 5. Wielowarstwowa struktura GMR wykazująca antrywnoległe kierunki namagnesowania ferromagnetyków (a) oraz zależność jej rezystancji od pola magnetycznego (b).

Budowa i zasada działania czujników GMR

Czujniki GMR do pomiaru pola magnetycznego składają się najczęściej z czterech elementów połączonych w konfiguracji mostkowej (rys. 6a). Elementy GMR mostka posiadają nominalnie takie same rezystancje. Elementy mostka R_1 i R_4 izolowane są od oddziaływania pola magnetycznego przez ekrany magnetyczne. Izolowanie to powoduje, że tylko nieekranowane elementy zmieniają rezystancję pod wpływem pola magnetycznego. W wyniku działania tego pola rezystancja elementów R_2 i R_3 zmienia się zgodnie z ich charakterystyką $R-H$ przedstawioną na rys. 5b, co skutkuje powstaniem napięcia U_{wy} proporcjonalnego do pola. Zgodnie z zależnościami obowiązującymi dla tego typu mostka, przy założeniu braku obciążenia prądowego zacisków wyjściowych, napięcie wyjściowe wynosi:

$$U_{wy} = U_{zas} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3)$$

Wyidealizowaną charakterystykę przetwarzania $U_{wy}(H)$ czujnika przedstawia rys. 6b. Charakterystyka taka służy do określenia istotnych parametrów i właściwości pomiarowych czujników, do których należą: zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowości, histereza i napięcie zerowe.



Rys. 6. Schemat funkcjonalny czujnika GMR zbudowanego z elementów typu wielowarstwa (a) oraz jego charakterystyka przetwarzania (b).

d) Czujniki AMR i GMR w pomiarach pola magnetycznego

Czujniki AMR i GMR ze względu na możliwość pomiaru zarówno stałego, jaki i zmiennego pola, niski pobór mocy, małe rozmiary, łatwość integracji z technologią półprzewodnikową oraz niskie koszty są często stosowane w pomiarach i detekcji pola magne-

tycznego. Ponadto są szeroko stosowane w pomiarach prędkości obrotowej, kąta, przemieszczenia, położenia oraz natężenia prądu elektrycznego.

Komercyjne czujniki AMR i GMR posiadają zakresy pomiarowe od kilkuset μT do kilkudziesięciu mT oraz mogą mierzyć pole o częstotliwości do kilku MHz. Pamiętać należy, że pole magnetyczne maleje ze wzrostem odległości od źródła, stąd też zakres mierzonego pola przez dany czujnik można zmienić przez zmianę tej odległości. W przypadku detekcji lub pomiaru bardzo słabego pola ($< \mu\text{T}$) limit detekcyjności tych czujników jest rzędu kilkuset pT dla niskich częstotliwości pola i poprawia się ze wzrostem częstotliwości. Wynika to z faktu odwrotnej proporcjonalności szumów własnych czujników do częstotliwości pola ($1/f$).

W badaniu właściwości pomiarowych czujnika najistotniejsza jest jego charakterystyka przetwarzania oraz charakterystyka szumowa. Charakterystyka szumowa jest pomocna przy określeniu poziomu detekcyjności czujnika. Charakterystyka przetwarzania natomiast umożliwia wyznaczenie parametrów takich jak: zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowości, histereza i napięcie zerowe.

Zakres pomiarowy definiuje się jako przedział wartości pola, w którym błąd liniowości nie przekracza zadanej wartości.

Czułość definiuje się jako nachylenie charakterystyki przetwarzania $\Delta U_{wy}/\Delta H$.

Rozdzielczość jest to najmniejsza inkrementalna zmiana pola, która powoduje wykrywalną zmianę napięcia wyjściowego.

Błąd liniowości określa się jako procentową odchyłkę charakterystyki przetwarzania czujnika od idealnej charakterystyki przetwarzania (linii o nachyleniu określonym przez czułość).

Histereza jest miarą różnicy w wartościach napięcia wyjściowego przy wzroście i zmniejszaniu pola magnetycznego.

Napięcie zerowe wyznacza poziom napięcia wyjściowego czujnika w zerowym polu magnetycznym.

Ad 2. Pomiar pola magnetycznego z użyciem czujników AMR i GMR

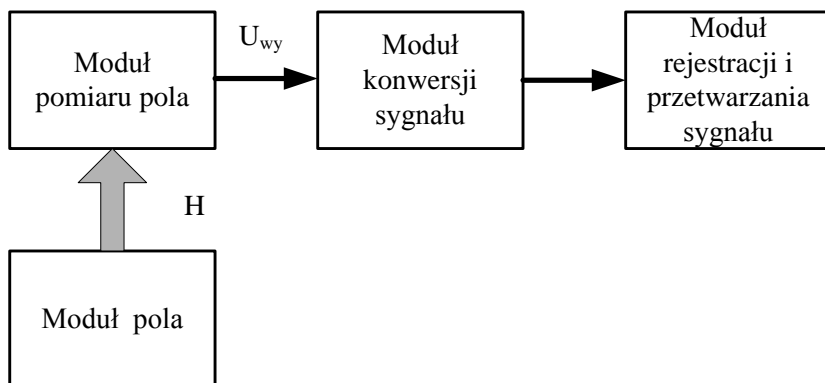
a) Badanie właściwości pomiarowych czujników

Przed przystąpieniem do badania czujników i pomiaru pola z ich użyciem należy zapoznać się z systemem pomiarowym i danymi katalogowymi czujników.

System pomiarowy ma budowę modułową przedstawioną na rys. 7. W skład modułu wytwarzania pola wchodzi źródła pola stałego (magnes trwałe) i zmiennego (cewki Helmholtza zasilane źródłem prądu sterowanym generatorem przebiegów elektrycznych). Moduł pomiaru pola tworzą czujnik, wzmacniacz napięciowy oraz ich układy zasilania. Moduły konwersji oraz rejestracji i przetwarzania sygnału stanowią karta pomiarowa i komputer. System ten pozwala mierzyć pole magnetyczne w warunkach laboratoryjnych

oraz badać właściwości metrologiczne czujników dla pola stałego, przemiennego sinusoidalnego i niesinusoidalnego.

W ćwiczeniu wykorzystywane będą czujniki pola typu AMR serii HCM 10xx oraz GMR serii AAxx.



Rys. 7. Schemat modułowy systemu do badania czujników i pomiarów pola magnetycznego.

W celu przygotowania systemu do pomiarów należy połączyć moduły i zaznajomić się z programem do sterowania i rejestracji danych pomiarowych.

Dla wybranych czujników należy zmierzyć charakterystyki przetwarzania $U_{wy}(H)$. Pomiary charakterystyk przeprowadzić dla prądu stałego, przemiennego sinusoidalnego i niesinusoidalnego oraz dla kilku różnych wartości napięcia zasilania czujnika. Na podstawie zmierzonych charakterystyk $U_{wy}(H)$ należy wyznaczyć: czułość, zakres pomiarowy, rozdzielczość, błąd liniowości, histerezę i napięcie zerowe czujników. Ponadto należy wyznaczyć stałe kalibracji badanych czujników. Należy również ocenić wpływ rodzaju pola magnetycznego na czułość i rozdzielczość czujników. W tym celu należy wyznaczyć zmianę czułości i rozdzielczości czujników dla pola sinusoidalnego i niesinusoidalnego względem czułości i rozdzielczości dla pola stałego.

b) Pomiary natężenia pola magnetycznego

Stosując jako źródło pola magnetycznego magnes trwały, zmierzyć wartość wytwarzanego przez niego pola magnetycznego w funkcji odległości od czujnika. Następnie wykorzystując cewki Helmholtza i źródło prądowe sterowane generatorem przebiegów elektrycznych, zmierzyć pola wytwarzane przez cewki dla zasilania ich prądem stałym, sinusoidalnym i niesinusoidalnym. Korzystając z danych katalogowych przyrządów oszacować niepewność pomiaru pola.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, czujniki oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.

Wykaz aparatury

1. Generator przebiegów elektrycznych,
2. Cewki Helmholtza,
3. Zasilacz prądowy bipolarny,
4. Magnes trwały,
5. Karta pomiarowa,
6. Czujniki GMR firmy NVE serii AAX,
7. Czujniki AMR firmy Honeywell serii HCM.

Ćwiczenie 4

Pomiary natężenia prądu elektrycznego z użyciem czujnika GMR

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości i możliwości pomiarowych czujników prądu elektrycznego, zbudowanych w oparciu o elementy spintroniczne, wykazujące efekt gigantycznej magnetorezystancji (GMR).

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Prąd elektryczny
 - b. Elementy wykazujące zjawisko gigantycznej magnetorezystancji
 - c. Czujniki prądu zbudowane w oparciu o elementy GMR
 - d. Czujniki GMR w pomiarach prądu elektrycznego
2. Pomiar natężenia prądu elektrycznego z użyciem czujnika GMR
 - a) Badanie właściwości pomiarowych czujników
 - b) Pomiar natężenia prądu

Zakres wymaganych wiadomości

Rodzaje prądu elektrycznego, jednostki. Zasada działania i budowa czujników prądu wykonanych w oparciu o czujniki GMR. Pojęcia krzywej przetwarzania, czułości, rozdzielczości, liniowości, histerezy, napięcia zerowego dla czujników prądu GMR. Właściwości pomiarowe czujników GMR w pomiarach stałego i przemiennego prądu elektrycznego.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków. 2011.
- [3] Noty katalogowe czujników GMR firmy NVE.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

a) Prąd elektryczny

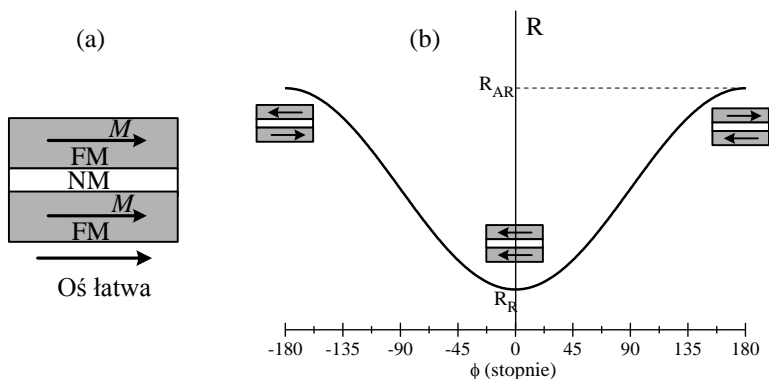
Prąd elektryczny jest to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych. Jednostką prądu elektrycznego jest amper (A). Wyróżnia się trzy rodzaje prądu elektrycznego: stały, zmienny i przemienny. Cechą charakterystyczną prądu stałego jest niezmiennosc jego natężenia w czasie. Prąd zmienny natomiast zmienia wartość w czasie, ale nie kierunek. W przypadku prądu przemiennego zmienia się zarówno jego wartość, jak i kierunek, a charakter tych zmian może być w szczególności sinusoidalny. Jak wynika z definicji prądu elektrycznego powstaje on w obiektach, w których występuje uporządkowany ruch ładunków elektrycznych. Najpowszechniejszymi obiektami, w których występuje prąd są różnego rodzaju obwody i urządzenia elektryczne oraz elektroniczne, a ponadto w organizmach żywych. Zakres wartości natężeń prądu, z którymi mamy do czynienia w tych obiektach jest bardzo szeroki od pA do kA. W zależności od wartości i rodzaju prądu, wymaganej czułości i rozdzielczości pomiaru oraz specyficznych wymagań (np. pomiar z galwaniczną izolacją) stosuje się różne metody jego pomiaru. Do najpopularniejszych metod należą: galwanometryczne, bocznikowe, przekładnikowe, pomiary czujnikami Halla i czujnikami magnetorezystancyjnymi. Przedmiotem badań w ćwiczeniu są czujniki magnetorezystancyjne zbudowane w oparciu o elementy wykazujące efekt gigantycznej magnetorezystancji. Czujniki te pozwalają mierzyć natężenie wymienionych rodzajów prądu elektrycznego w szerokim zakresie częstotliwości. W szczególności omówione i poddane badaniom zostaną komercyjne czujniki mające zastosowanie w detekcji i pomiarach prądu elektrycznego.

b) Elementy wykazujące zjawisko gigantycznej magnetorezystancji

Efekt gigantycznej magnetorezystancji obserwuje się w cienkowarstwowych układach (grubości nanometrowe), w których dwa materiały ferromagnetyczne (FM) przedzielone są niemagnetycznym materiałem przewodzącym (NM) (rys. 1a). Efekt ten opisany jest zależnością rezystancji układu od kąta ϕ pomiędzy kierunkami namagnesowania warstw ferromagnetycznych.

$$R(\phi) = R_R + \left(\frac{R_{AR} - R_R}{2} \right) [1 - \cos(\phi)] \quad (1)$$

Rezystancja takiego układu jest najmniejsza, gdy kierunki są równoległe (R_R) a największa, gdy kierunki są antyrównoległe (R_{AR}) (rys. 1b). Gigantyczną magnetorezystancję definiuje się jako $GMR = [(R_{AR} - R_R) / R_R] 100 \%$, osiąga ona wartości do kilkunastu procent w praktycznych układach.

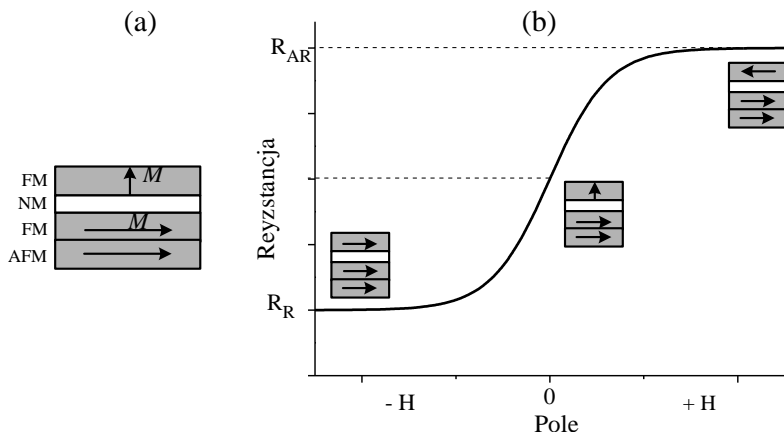


Rys. 1. Struktura warstwowa wykazująca efekt GMR (a) oraz zależność jej rezystancji od kąta między kierunkami namagnesowania ferromagnetyków (b).

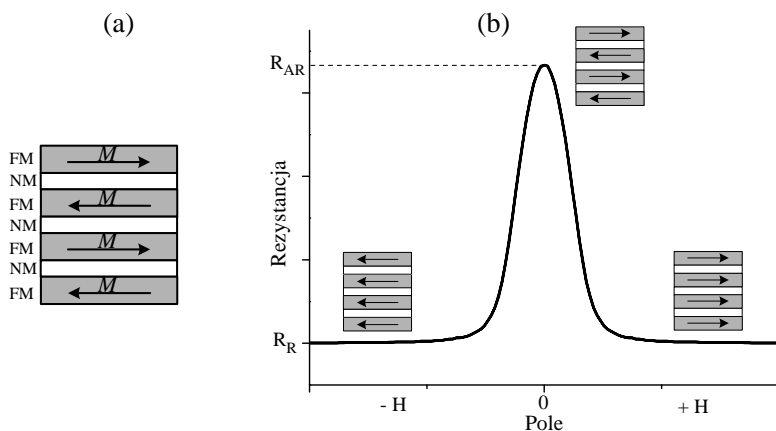
Elementy GMR w zależności od ich właściwości magnetycznych mogą wykazywać skokowe lub monotoniczne przejście między rezystancjami R_R i R_{AR} . Zmianę rezystancji elementu wymusza się przez poddanie go działaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Elementy wykazujące skokowe zmiany rezystancji nie nadają się do pomiaru pola ze względu na histeryzę charakterystyki $R-H$. W celu użycia elementu GMR do budowy czujnika pola magnetycznego konieczne jest by jego charakterystyka $R-H$ nie wykazywała histerezy, była linowa a ponadto symetryczna względem zera pola magnetycznego. W celu uzyskania elementu o takich właściwościach wykorzystuje się metodę anizotropii prostokątnych lub sprzężenia antyferromagnetycznego między ferromagnetykami w strukturze wielowarstwowej.

W metodzie anizotropii, wymusza się wzajemnie prostopadłe ułożenie namagnesowań M ferromagnetyków (kąt $\phi = 90^\circ$) w warunkach, gdy na element nie działa pole magnetyczne (rys. 2a). W układzie takim ponadto jeden z ferromagnetyków posiada zamocowany magnetycznie kierunek namagnesowania (tzn. w pewnym zakresie pola jego kierunek nie zmienia się), przez wykorzystanie zjawiska sprzężenia wymiennego typu „exchange bias” na styku ferromagnetyk/antyferromagnetyk (FM/AFM). Struktura taka nosi nazwę zawór spinowy. Struktura ta w zerowym polu wykazuje rezystancję $(R_{AR} + R_R)/2$ a przyłożenie pola wywołuje zmianę kąta ϕ od 0° do 180° , co skutkuje zmianą rezystancji od R_R do R_{AR} . W drugiej metodzie wykorzystuje się fakt występowania silnego sprzężenia antyferromagnetycznego między warstwami ferromagnetycznymi w strukturze wielowarstwowej (rys. 3a), które powoduje, że w zerowym polu kierunki namagnesowań ferromagnetyków są antyrównoległe (rys. 3b). Struktura wielowarstwowa wykazująca sprzężenia antyferromagnetyczne osiąga maksymalną rezystancję R_{AR} dla $H=0$ (rys. 3b). Ze wzrostem wartości pola warstwy o namagnesowaniach przeciwnie skierowanych do pola zmieniają kierunki do osiągnięcia stanu, gdy ich namagnesowania będą skierowane zgodnie z kierunkiem działającego pola. Takie ułożenie namagnesowań warstw skutkuje minimalną rezystancją elementu, R_R . Należy zwrócić uwagę na różnice w charakterystyce $R-H$ elementów wykorzystujących struktury GMR typu wielowarstwa i zawór spinowy. Element GMR typu wielowarstwa wykazuje omnipolarną charakterystykę $R-H$ (rys. 3b) tzn. rezystancja elementu nie

zależy od biegunowości (zwrotu) przyłożonego pola, natomiast charakterystyka elementu typu zawór spinowy jest bipolarna (rys. 2b).



Rys. 2. Struktura GMR typu zawór spinowy z wzajemnie prostopadłymi kierunkami namagnesowań w zerowym polu magnetycznym (a) oraz jej charakterystyka R - H (b).



Rys. 3. Struktura warstwowa wykazująca efekt GMR (a) oraz jej charakterystyka rezystancja od pola magnetycznego (b).

c) Czujniki prądu zbudowane w oparciu o elementy GMR

Do budowy czujników prądu stosuje się omówione wcześniej elementy GMR typu wielowarstwa lub zawór spinowy. W zależności od zastosowanych elementów konstrukcje

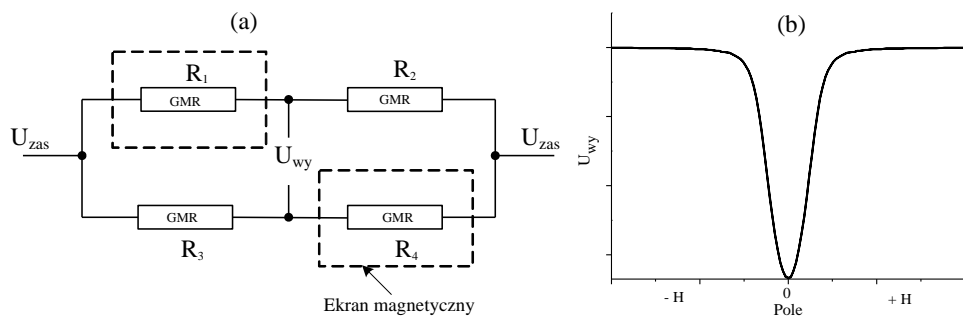
czujników różnią się znacząco. Czujnik prądu zbudowany z elementów typu wielowarstwa składa się z czterech elementów połączonych w konfiguracji mostkowej (rys 4a). Elementy GMR mostka posiadają nominalnie takie same rezystancje. Elementy mostka R_1 i R_4 izolowane są od oddziaływania pola magnetycznego przez ekrany magnetyczne. Izolowanie to powoduje, że tylko nieekranowane elementy zmieniają rezystancję pod wpływem działającego pola magnetycznego. W wyniku działania tego pola rezystancja elementów R_2 i R_3 zmienia się, co skutkuje powstaniem napięcia U_{wy} proporcjonalnego do pola. Zgodnie z zależnościami obowiązującymi w tego typu mostku, przy założeniu braku obciążenia prądowego zacisków wyjściowych, napięcie wyjściowe wynosi:

$$U_{wy} = U_{zas} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2)$$

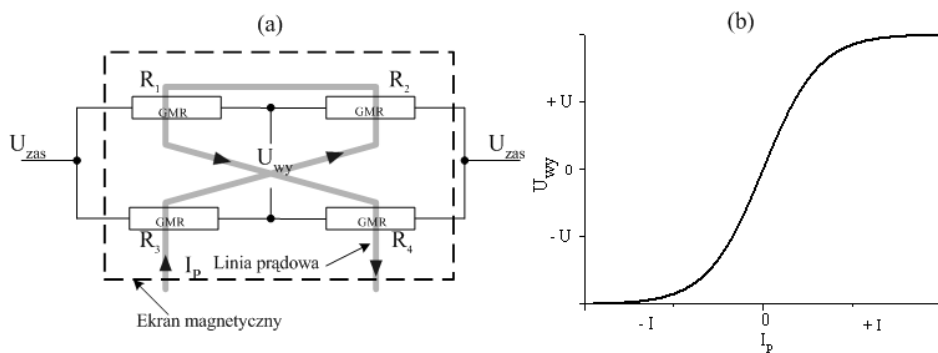
Wyidealizowaną charakterystykę przetwarzania $U_{wy}(H)$ czujnika przedstawia rys. 4b. Charakterystyka taka służy do określenia istotnych właściwości i parametrów pomiarowych czujników, do których należą: zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowości, histereza i napięcie zerowe.

Czujniki prądu wykorzystujące elementy GMR typu zawór spinowy zbudowane są również z czterech elementów połączonych w konfiguracji mostkowej (rys. 5a), przy czym wszystkie elementy mostka są ekranowane magnetycznie przed oddziaływaniem zewnętrznego pola magnetycznego. Aby możliwy był pomiar prądu takim czujnikiem integruje się z nim (w jednej obudowie – budowa monolityczna) linię prądową, (rys. 5a). Linia ta umieszczona jest bezpośrednio nad elementami i poprowadzona w taki sposób, aby przepływający przez nią prąd wytwarzał w elementach R_1 i R_4 pole magnetyczne o kierunku przeciwnym do pola w elementach R_2 i R_3 . W takich warunkach dla określonego kierunku prądu I_p w linii, jego wzrost powoduje zmniejszenie rezystancji elementów R_1 i R_4 oraz wzrost rezystancji elementów R_2 i R_3 . Powoduje to, zgodnie z zależnością (2), powstanie napięcia U_{wy} na zaciskach wyjściowych czujnika. Wyidealizowaną charakterystykę $U_{wy}(I_p)$ tego typu czujnika przedstawia rys. 5b. Należy zwrócić uwagę, że charakterystykę przetwarzania tego czujnika cechuje bipolarność.

Pomiar prądu omówionymi typami czujników odbywa się pośrednio przez pomiar pola magnetycznego. Z punktu widzenia zastosowań pomiarowych omówionych czujników najistotniejsze są ich charakterystyki przetwarzania. Dysponując takimi charakterystykami można na ich podstawie określić istotne właściwości i parametry pomiarowe danego czujnika.



Rys. 4. Schemat funkcjonalny czujnika GMR zbudowanego z elementów typu wielowarstwa (a) oraz jego charakterystyka przetwarzania (b).



Rys. 5. Schemat funkcjonalny monolitycznego czujnika prądu zbudowanego z elementów GMR typu zawór spinowy (a) oraz jego charakterystyka przetwarzania (b).

d) Czujniki GMR w pomiarach prądu elektrycznego

Czujniki GMR ze względu na możliwości pomiaru i detekcji prądu w szerokim zakresie częstotliwości i o różnych kształtach przebiegów czasowych, krótką odpowiedź czasową (rzędu μs) oraz niskie koszty, są szeroko stosowane w układach wymagających szybkiej detekcji zmian prądu oraz jego monitoringu. Przykładem takich zastosowań są układy zabezpieczające przed przeciążeniem prądowym oraz układy sterowania przemysłowego. W ocenie właściwości pomiarowych czujnika najistotniejsza jest jego charakterystyka przetwarzania oraz charakterystyka szumowa. Charakterystyka szumowa jest pomocna przy określeniu poziomu detekcyjności czujnika. Charakterystyka przetwarzania, natomiast umożliwia wyznaczenie parametrów czujnika takich jak: zakres mierzonego pola, czułość, rozdzielczość, błąd liniowości, histereza i offset.

Zakres pomiarowy definiuje się jako przedział wartości pola, w którym błąd liniowości nie przekracza zadanej wartości.

Czułość definiuje się jako nachylenie charakterystyki przetwarzania $\Delta U_{wy}/\Delta H$.

Rozdzielczość jest to najmniejsza inkrementalna zmiana pola, która powoduje wykrywalną zmianę napięcia wyjściowego.

Błąd liniowości określa się jako procentową odchyłkę charakterystyki przetwarzania czujnika od idealnej charakterystyki przetwarzania (linii o nachyleniu określonym przez czułość).

Histeresa jest miarą różnicy w wartościach napięcia wyjściowego przy wzroście i zmniejszaniu pola magnetycznego.

Napięcie zerowe określa poziom napięcia wyjściowego czujnika przy zerowym prądzie.

Ad 2. Pomiar natężenia prądu elektrycznego z użyciem czujnika GMR

a) Badanie właściwości pomiarowych czujników

Przed przystąpieniem do badania czujników i pomiaru prądu z ich użyciem należy zapoznać się z systemem pomiarowym i danymi katalogowymi czujników.

System pomiarowy ma budowę modułową przedstawioną na rys. 6. Moduł źródła prądu składa się z generatora przebiegów elektrycznych oraz bipolarnego źródła prądu (napięcia). Moduł pomiaru prądu tworzą czujnik, wzmacniacz napięciowy oraz ich układy zasilania. Moduły konwersji oraz rejestracji i przetwarzania sygnału stanowią karta pomiarowa i komputer. System ten pozwala mierzyć prąd elektryczny w warunkach laboratoryjnych oraz badać właściwości metrologiczne czujników dla prądu stałego, przemiennego sinusoidalnego i niesinusoidalnego.

W ćwiczeniu wykorzystywane będą czujniki prądu typu zawór spinowy GMR (AAV) i wielowarstwa GMR (AG).

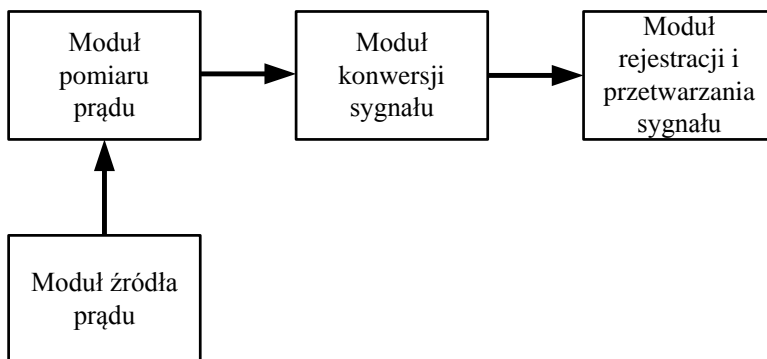
W celu przygotowania systemu do pomiarów należy połączyć moduły i zaznajomić się z programem do sterowania i rejestracji danych pomiarowych.

Dla wybranych czujników należy zmierzyć charakterystyki przetwarzania $U_{wy}(I_p)$. Pomiarów charakterystyk przeprowadzić dla prądu stałego, przemiennego sinusoidalnego i niesinusoidalnego oraz dla kilku różnych wartości napięcia zasilania czujnika. Na podstawie zmierzonych charakterystyk $U_{wy}(I_p)$ należy wyznaczyć: czułość, zakres pomiarowy, rozdzielczość, błąd liniowości, histerezę i napięcie zerowe czujników. Ponadto należy wyznaczyć stałe kalibracji badanych czujników. Należy również ocenić wpływ kształtu przebiegu prądu na czułość i rozdzielczość czujników. W tym celu należy wyznaczyć zmianę czułości i rozdzielczości czujników dla prądu sinusoidalnego i niesinusoidalnego względem prądu stałego.

b) Pomiar natężenia prądu

Korzystając ze źródła napięciowego zamiast prądowego w module prądu, należy wyznaczyć wartość natężenia prądu przepływającego przez linię prądową czujnika dla różnych wartości napięcia źródła. Pomiarów przeprowadzić dla napięcia stałego, przemiennego sinusoidalnego i niesinusoidalnego. Korzystając z danych katalogowych przyrządów oszacować niepewność pomiaru prądu.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, czujniki oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.



Rys. 6. Schemat modułowy systemu do badania czujników i pomiaru prądu elektrycznego.

Wykaz aparatury

1. Generator przebiegów,
2. Zasilacz prądowy bipolarny,
3. Karta pomiarowa,
4. Czujniki serii AAV i AAxx firmy NVE,
5. Komputer.

Ćwiczenie 5

Pomiar przemieszczenia z użyciem czujnika AMR

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową oraz zasadą działania czujnika AMR (Anisotropii Magnetooporności), pracującego jako czujnik przemieszczenia.

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Zastosowanie czujników przemieszczenia
 - b. Opis czujnika LKxx
2. Pomiary przemieszczenia
 - a. System pomiarowy
 - b. Pomiary przemieszczenia

Zakres wymaganych wiadomości

Metody pomiaru przemieszczenia, efekt AMR, zasada działania czujnika AMR w konfiguracji pomiaru przemieszczenia, zasada działania mostka Wheatstone'a.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetoopornościowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wyd. AGH, Kraków, 2011.
- [3] Dane katalogowe czujnika LK16.
- [4] Dane katalogowe czujnika LK40.
- [5] Dane katalogowe układu EKL01.
- [6] Dane katalogowe układu ELS29-nI-SST03-01

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

a) Zastosowanie czujników przemieszczenia

Czujniki przemieszczenia są szeroko stosowanymi rozwiązaniami w układach przemysłowych. Do pomiarów przesunięcia stosuje się między innymi następujące typy czujników:

- optyczne,
- piezoelektryczne,
- magnetorezystancjne,
- pojemnościowe,
- indukcyjne,
- hallowskie.

Wybór rodzaju czujnika uzależniony jest od zastosowania.

Czujniki optyczne charakteryzują się bardzo dużą dokładnością (nawet do 10^{-7} m) oraz szerokim zakresem działania (do 1 m), jednak są skomplikowane w zastosowaniu oraz nieodporne na czynniki zewnętrzne, na przykład zanieczyszczenia.

Czujniki piezoelektryczne, pojemnościowe oraz transformatorowe wymagają często dodatkowego układu elektronicznego do poprawnej pracy. Ze względu na charakterystykę działania czujniki te pracują w niewielkich zakresach (10^{-6} - 10^{-1} m).

Ze względu na niskie koszty wytworzenia czujnika, prostotę działania oraz odporność na wiele czynników zewnętrznych czujniki oparte o efekt magnetorezystancyjny są stosowane w wielu rozwiązaniach przemysłowych. W zależności od konfiguracji pracy, czujniki te mogą pracować w zakresie do 10^{-1} m.

Cwiczenie zostanie przeprowadzone w oparciu o czujnik wykorzystujący efekt anizotropowej magnetorezystancji LKxx firmy Sensitec.

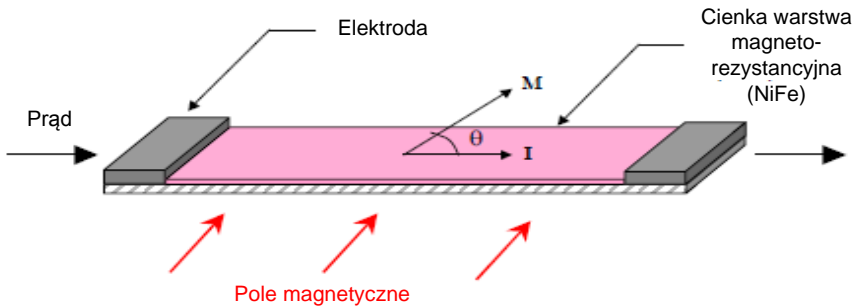
b) Opis czujnika LKxx

Sensory z grupy LKxx wykorzystują efekt anizotropowej magnetorezystancji wywołany zewnętrznym polem magnetycznym. Aby sensor pracował jako czujnik przemieszczenia, musi znajdować się on w określonej odległości od źródła pola magnetycznego (np. magnesu trwałego), który jest zamontowany na ruchomym elemencie. Gdy magnes zmienia swoją pozycję względem czujnika, zmienia się rezystancja czujnika, co widoczne jest jako zmiana napięcia wyjściowego. W układzie mostkowym napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do położenia czujnika względem pozycji zerowej (początkowej).

Podstawą działania sensora typu LKxx jest efekt anizotropowej magnetorezystancji AMR. Zjawisko AMR jest obserwowane w materiałach ferromagnetycznych i jest najczęściej wykorzystywane w cienkich warstwach stopów ferromagnetycznych uformowanych w formie pasków o ustalonej rezystancji. Czujnik LKxx składa się z dwóch mostków Wheatstone'a, każdy utworzony przez cztery elementy AMR. Każdy element magnetorezystancyjny zmienia swoją rezystancję jak we wzorze:

$$R = R_{\perp} + \frac{R_{\parallel} - R_{\perp}}{2} \cdot (1 + \cos(2\theta)) \quad (1)$$

gdzie θ jest kątem pomiędzy wektorem magnetyzacji (\mathbf{M}) oraz wektorem gęstości prądu (\mathbf{I}) (rys. 1), a R_{\perp} oraz R_{\parallel} to rezystancja elementu AMR, gdy wektory magnetyzacji są ułożone odpowiednio prostopadle i równolegle.

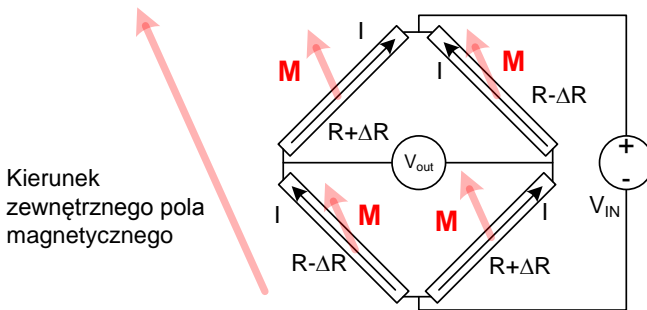


Rys. 1. Pasek cienkiej warstwy ferromagnetycznej wykazujący anizotropowy efekt magnetorezystancyjny.

Żeby móc praktycznie wykorzystać zjawisko AMR, cztery jednakowe paski są ułożone jak na rys. 2, w formie tworzącej mostek. Zgodnie z zasadą działania mostka, jeżeli nie jest przyłożone pole magnetyczne wszystkie elementy mają jednakową rezystancję i na wyjściu nie pojawia się napięcie. Jeżeli elementy w mostku posiadają różną rezystancję ze względu na efekt AMR, napięcie wyjściowe jest wyrażone wzorem:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \left(\frac{R_{\parallel} - R_{\perp}}{R_{\parallel} + R_{\perp}} \right) \cdot \cos(2\theta) \quad (2)$$

gdzie V_{OUT} to napięcie wyjściowe mostka, a V_{IN} to napięcie zasilania.

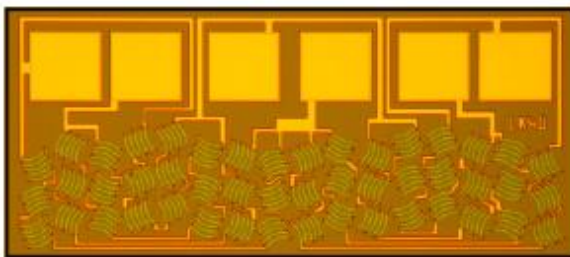


Rys. 2. Cztery elementy AMR w układzie mostka Wheatstone'a gdzie $\Delta R = R_{\parallel} - R_{\perp}$.

Przy odpowiednio dużym polu magnetycznych, takim by całkowicie przemagnesować pasek (typowo ok. 8 kA/m, co odpowiada 100 Oe), wyjście układu jest proporcjonalne do kąta pomiędzy osią mostka, a wektorem pola magnetycznego.

Pojedynczy mostek pozwala na detekcję kąta w zakresie $\pm 45^\circ$, co w przypadku pomiaru przesunięcia odpowiada zakresowi do 30 mm (w zależności od użytego magnesu). Czujnik LKxx składa się z 2 mostków AMR, obróconych względem siebie o kąt 45° do detekcji w zakresie $\pm 90^\circ$. Dzięki temu, w zależności od użytego magnesu, może pracować

wać w konfiguracji pomiaru przesunięcia w zakresie do 100 mm z dokładnością (0.005 mm – 0.1 mm).



Rys. 3. Budowa wewnętrzna czujnika LK40.

Napięcie wyjściowe pojedynczego mostka można obliczyć ze wzoru (2). W przypadku dwóch mostków korzystamy z dwóch sygnałów wyjściowych przesuniętych w fazie o 45° , zatem jedno z wyjść jest proporcjonalne do sinusa, a drugie do cosinusa. Typowa charakterystyka czujnika jest przedstawiona na rys. 4.

Ze względu na proces technologiczny elementy w mostku mogą nie mieć identycznych parametrów, przez co sygnał może być przesunięty względem poziomu równowagi (offset voltage). Błąd ten można wyeliminować poprzez zastosowanie układu kompensującego (przy okazji wzmacniania sygnału) lub uwzględnić przesunięcie w programie odczytującym dane z czujnika (mikrokontroler, karta pomiarowa).

Jak większość elementów elektronicznych czujniki magnetorezystancyjne posiadają pewien współczynnik temperaturowy. Dane te podane są przez producenta (w przypadku LK40 jest to $-0.4\ \%/^\circ\text{C}$ dla czułości i niezdefiniowana wartość dla przesunięcia). W przypadku pracy układu przy dużych zmianach temperatury należy te wartości uwzględnić w obliczeniach.

Praca przy użyciu matrycy czujników wymaga uwzględnienia dystrybucji ich czułości. Podobnie jak w przypadku przesunięcia błąd ten może zostać wyeliminowany poprzez uwzględnienie różnicy w czułościach po stronie analogowej (różne wzmocnienie) lub cyfrowej (korekcja po stronie odczytu).

Ad 2. Pomiary przemieszczenia

a) System pomiarowy

System pomiarowy składa się z następujących elementów:

- modułu czujnika (czujnik, zasilanie),
- źródła pola magnetycznego (magnes trwałe),
- modułu pomiarowego (karta pomiarowa, multimetr),
- komputera wraz z oprogramowaniem.

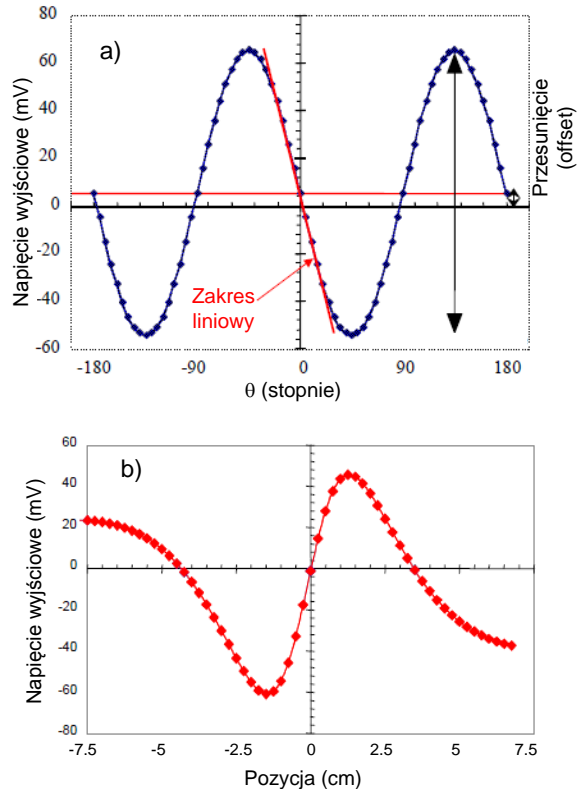
b) Pomiary przemieszczenia

Przesunięcie źródła pola magnetycznego względem modułu czujnika skutkuje zmianą

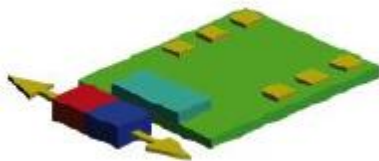
sygnału wyjściowego. Sygnał ten jest mierzony za pomocą miernika i wysyłany do komputera poprzez interfejs szeregowy.

Do pomiarów przesunięcia można użyć kilku różnych rozwiązań układowych.

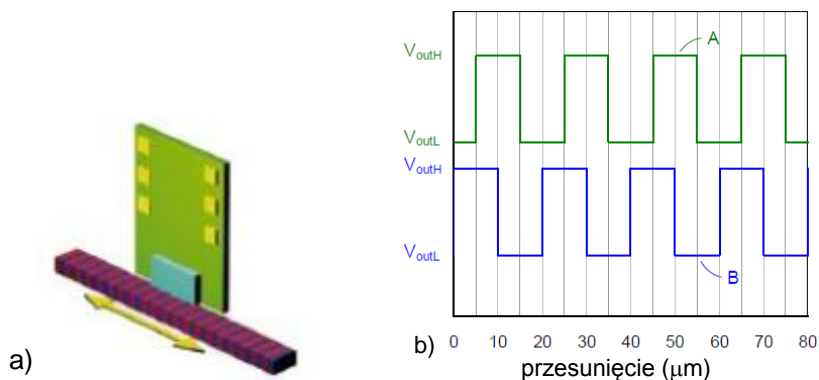
W pierwszym przykładzie pojedynczy magnes porusza się wzdłuż osi równoległej do osi czujnika (rys. 5). Przesunięcie magnesu od pozycji zerowej wywołuje zmianę kąta namagnesowania sensora. W liniowym zakresie pracy, sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do wielkości przesunięcia, przez co układ działa jako czujnik przemieszczenia (rys. 4b).



Rys. 4. Wykres napięcia wyjściowego czujnika LKxx w funkcji kąta θ (a) oraz pozycji (b).



Rys. 5. Czujnik magnetyczny w układzie pomiaru przesunięcia.



Rys. 6. Czujnik LK40 działający w układzie pomiaru przesunięcia.

W kolejnym podejściu przemiennie namagnesowany pasek o stałej odległości pomiędzy biegunami, porusza się w danej odległości od czujnika (rys. 6a). Przesunięcie namagnesowanego paska względem sensora powoduje, że na wyjściach pojawiają się dwa sygnały przesunięte w fazie. Zastosowanie układu przetwarzającego (np. ELS29-nI-SST03-01) pozwala na względny odczyt pozycji poprzez zliczanie impulsów (rys. 6b).

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, czujniki oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.

Wykaz aparatury

1. Multimetr/Karta pomiarowa,
2. Zestaw czujników AMR,
3. Zasilanie (baterie, zasilacz),
4. Mechaniczny układ do pomiaru przemieszczenia.

Ćwiczenie 6

Pomiar kąta z użyciem czujnika TMR

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania czujnika kąta, zbudowanego w oparciu o elementy, wykazujące efekt tunelowej magnetorezystancji (TMR) oraz poznanie jego właściwości pomiarowych.

Program ćwiczenia

1. Wstęp
 - a. Zastosowanie czujników kąta
 - b. Opis czujnika AAT
2. Pomiary kąta
 - a. System pomiarowy
 - b. Pomiar kąta czujnikiem AAT

Zakres wymaganych wiadomości

Metody pomiaru kąta, efekt TMR, zasada działania czujnika TMR w konfiguracji pomiaru kąta.

Literatura

- [1] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [2] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.
- [3] Dane katalogowe AAT001.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Wstęp

a) Zastosowanie czujników kąta

Do pomiarów kąta można zastosować następujące typy czujników:

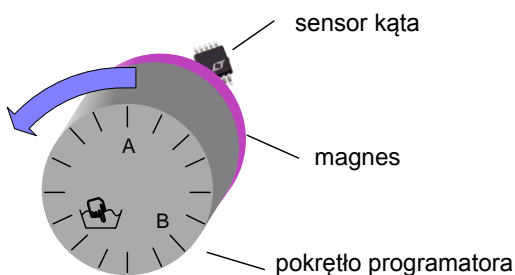
- magnetorezystancyjne,
- hallowskie,

- indukcyjne,
- optyczne.

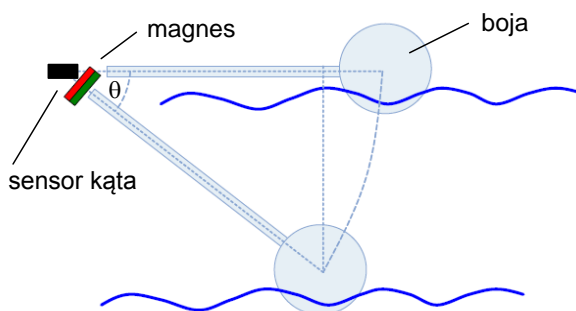
Czujniki do detekcji kąta wykorzystywane są m.in. w następujących aplikacjach: pomiar położenia kierownicy w celu automatycznego wspomagania, pomiar pozycji pedału hamulca/gazu, pomiar kąta przełącznika obrotowego (np. przełącznik wyboru programu w pralce automatycznej), pomiar poziomu cieczy. Ze względu na niesprzyjające warunki pracy, takie jak drgania mechaniczne czy zmiany temperatury, często wykorzystuje się do tego typu pomiarów czujniki magnetorezystancyjne, które są odporne na tego rodzaju zakłócenia. Ćwiczenie zostanie przeprowadzone w oparciu o sensor serii AAT firmy NVE.

b) Opis czujnika AAT

Czujnik AAT wykorzystuje efekt zmiany tunelowej magnetorezystancji, w funkcji pola magnetycznego. Aby sensor pracował w konfiguracji czujnika kąta, musi znajdować się on w określonej odległości od źródła pola magnetycznego (magnesu stałego), np. magnes zamontowany na obracającym się pokrętle programatora pralki automatycznej (rys. 1) czy w czujniku poziomu cieczy (rys. 2), w stałej odległości od nieruchomego sensora pola magnetycznego.

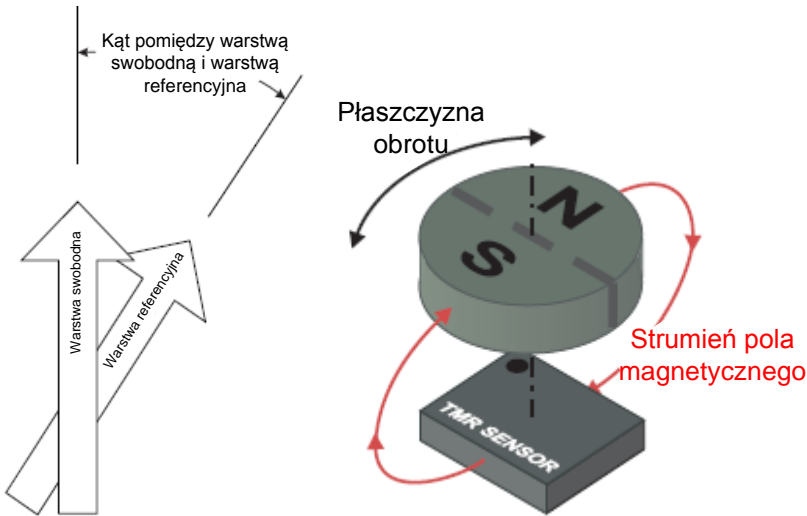


Rys. 1. Sensor magnetorezystancyjny jako czujnik położenia pokrętko programatora.



Rys. 2. Sensor magnetorezystancyjny jako czujnik poziomu cieczy.

Efekt TMR zachodzi w strukturach wielowarstwowych, gdzie dwie cienkie (rzędu nanometrów) warstwy ferromagnetyczne stanowiące elektrody, są rozdzielone izolatorem o grubości od 1 do 2 nm. Rezystancja mierzona na tych elektrodach zależy m.in. od grubości i rodzaju izolatora, rozmiarów geometrycznych struktury warstwowej czujnika i orientacji wektorów magnetyzacji dwóch elektrod ferromagnetycznych względem siebie (rys. 3). W praktycznych rozwiązaniach czujników rodzaj izolatora, jego grubość jak i rozmiary geometryczne czujnika są ściśle określone, zatem rezystancja zależy jedynie od kąta pomiędzy kierunkami magnetyzacji elektrod. W pomiarach kąta dąży się do sytuacji, gdzie jedna elektroda jest zamocowana, tzn. jej magnetyzacja jest stała i nie zależy od zewnętrznego pola magnetycznego, a druga swobodna, czyli magnetyzacja jest zawsze zgodna z kierunkiem zewnętrznego pola, stąd rezystancja czujnika zależy właśnie od tego kierunku.



Rys. 3. Schemat działania czujnika AAT.

Najczęściej konduktancja elementu TMR jest największa, gdy wektory magnetyzacji są do siebie równoległe. W pozostałych przypadkach zmienia się zgodnie ze wzorem:

$$G = G_S \cdot \left(1 + \frac{TMR}{2} \cdot \cos \theta \right) \quad (1)$$

gdzie θ to kąt, jaki tworzą magnetyzacje elektrod swobodnej i referencyjnej, G_S to średnia konduktancja ($G_S = 2/(R_{AP} + R_P)$), a TMR jest zdefiniowany jako:

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie R_{AP} i R_P to rezystancje elementu TMR, gdy wektory magnetyzacji są do siebie odpowiednio antyrównoległe i równoległe.

Sensor serii AAT składa się z czterech elementów TMR, umieszczonych pod różnym kątem, co 90° połączonych w formie pół-mostkowej (rys. 4). Wyjścia sensora są tak skonfigurowane, że sygnały są proporcjonalne odpowiednio do sinusa i cosinusa zadanego pola magnetycznego. Ze względu na dużą wartość magnetorezystancji tunelowej (w porównaniu do czujników AMR i GMR) AAT charakteryzuje się dużą czułością na poziomie 160 mV/V napięcia zasilania.

Podobnie jak wszystkie elementy elektroniczne sensor AAT posiada szereg parametrów, które zwiększają niedokładność pomiarową, takie jak:

- napięcie przesunięcia (w zakresie +/- 10 mV),
- współczynnik temperaturowy (+0.09 %/°C),
- błąd odczytu kąta (max. 3°) – wynikający z histerezy magnetycznej.

W celu zapewnienia poprawnej pracy urządzenia należy te niedokładności uwzględnić podczas kalibracji.

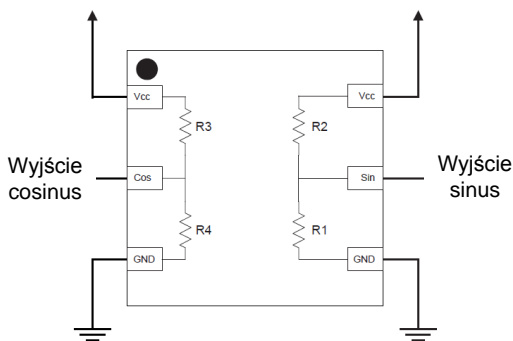
Podstawową zaletą czujnika TMR jest jego bardzo duży sygnał uzyskiwany dla czujników zminiaturyzowanych do rozmiarów mikrometrowych.

Ad 2. Pomiary kąta

a) System pomiarowy

System pomiarowy składa się z następujących elementów:

- modułu czujnika (czujnik, zasilanie),
- źródła pola magnetycznego (magnes trwały),
- modułu pomiarowego (karta pomiarowa, multimetr),
- komputera wraz z oprogramowaniem.



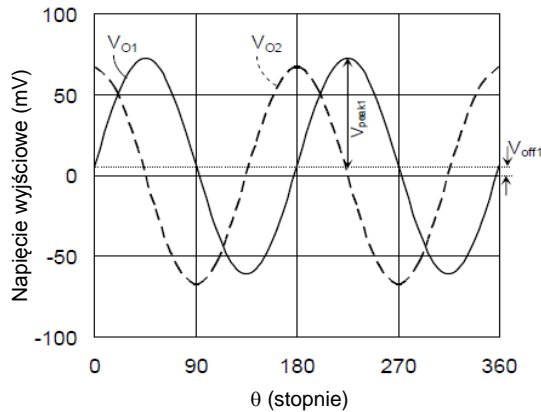
Rys. 4. Budowa wewnętrzna czujnika AAT.

b) Pomiar kąta czujnikiem ATT

Obrót czujnika względem źródła pola magnetycznego wywołuje zmianę sygnału wyjściowego. Sygnał ten jest mierzony za pomocą karty pomiarowej i wysyłany do komputera poprzez interfejs szeregowy.

Czujnik AAT posiada dwa wyjścia proporcjonalne odpowiednio do sinusa i cosinusa kąta, jaki tworzy zewnętrzne pole magnetyczne z osią sensora. Ze względu na różne czułości obydwu wyjść w różnych zakresach, do najdokładniejszej pracy układu należy wykorzystać obydwie sygnały wyjściowe (rys. 5).

Dla prawidłowej pracy czujnika AAT należy tak skonfigurować układ pomiarowy, aby na sensor oddziaływało pole rzędu od 2.4 kA/m do 16 kA/m (30 – 200 Oe). Pola o mniejszej wartości od podanej nie będą w stanie w odpowiedni sposób obrócić namagnesowania warstwy swobodnej elementu TMR, natomiast pola silniejsze mogą działać również na warstwę zamocowaną. Poprzez dobranie odpowiedniego magnesu oraz odległości pomiędzy nim a czujnikiem należy wybrać odpowiedni punkt pracy układu.



Rys. 5. Sygnały wyjściowe czujnika AAT.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia student otrzyma instrukcję wykonawczą opisującą szczegółowo stosowaną aparaturę pomiarową, czujniki oraz sposób wykonania i opracowania pomiarów.

Wykaz aparatury

1. Multimetr/Karta pomiarowa,
2. Zestaw czujników TMR,
3. Zasilanie (baterie, zasilacz),
4. Mechaniczny układ do pomiaru kąta.

Ćwiczenie 7

Symulacje numeryczne charakterystyk czujników magnetorezystancyjnych

Cel ćwiczenia: poznanie, za pomocą symulacji numerycznych własności magnetycznych struktur wielowarstwowych stosowanych w czujnikach magnetorezystancyjnych.

Program ćwiczenia

1. Użycie prostego modelu jednodomenowego do symulacji pętli histerezy magnetycznej
2. Narzędzie symulacyjne - program MAGEN2
3. Odtworzenie odpowiedzi polowej magnetorezystancyjnego układu mostkowego AMR
4. Symulacja charakterystyk namagnesowania i magnetorezystancyjnych GMR w układach wielowarstwowych
5. Szukanie parametrów na podstawie zmierzonych uprzednio charakterystyk
6. Odtworzenie odpowiedzi kątovej czujnika opartego na zaworze spinowym TMR

Zakres wymaganych wiadomości

Stan układu jako lokalne minimum energii, gradient energii, gęstość energii w cienkiej warstwie ferromagnetyka, efekt anizotropowej magnetorezystancji AMR, efekt gigantycznej magnetorezystancji GMR, efekt tunelowej magnetorezystancji TMR, mostek Wheatstone'a.

Literatura

- [1] A. Hubert and R. Schafer. *Magnetic Domains – The Analysis of Magnetic Microstructures*, 257, 306, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [2] M. Czapkiewicz. MAGEN2: layer.uci.agh.edu.pl/M.Czapkiewicz/Research/symul
- [3] OOMMF project at ITL/NIST: math.nist.gov/oommf.
- [4] S. Tumański. *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [5] Noty katalogowe czujników AMR firmy Honeywell.
- [6] Nota katalogowa czujnika AAT001.
- [7] T. Stobiecki i inni. *Urządzenia elektroniki spinowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.

Instrukcja wykonania ćwiczenia

Ad 1. Użycie prostego modelu jednodomenowego do symulacji pętli histerezy magnetycznej

Stan układu jako lokalne minimum energii

W przyrodzie każdy układ dąży do osiągnięcia lokalnego minimum energii, a jeśli będzie się znajdował w tym minimum, pozostanie w nim w równowadze stabilnej tak długo, jak długo nie zmieni się jego całkowita energia. Przykładowo, jeśli wyobrazimy sobie energię kulki na nierównym stoliku jako sumę jej energii kinetycznej oraz energii potencjalnej wynikającej z ukształtowania powierzchni na której leży kulka, to oczywistym jest, że kulka stoczy się w kierunku największego spadku. Jeśli kulka napotka na odpowiednio głęboki dołek, to po dyssypacji energii kinetycznej kulka pozostanie tam w równowadze trwałej. Dopiero nadanie kulce dużej energii kinetycznej lub zmianie kształtu funkcji energii potencjalnej (poprzez przechylenie stolika) spowoduje wyskok kulki z lokalnego minimum.

Podobnie zachowuje się wektor namagnesowania w ferromagnetyku – jego zwrot i kierunek, determinowany przez energię związaną z zewnętrznym polem magnetycznym oraz własnościami ferromagnetyka, będzie dążyć do spełnienia warunku lokalnego minimum energetycznego. Jeśli lokalne minimum nie jest minimum globalnym, to wektor namagnesowania może mieć np. dwa alternatywne kierunki – jest to przyczyną tzw. histerezy ferromagnetycznej.

Gęstość energii w warstwie ferromagnetycznej - prosty model jednodomenowy

Iloczyn pola magnetycznego H [A/m] oraz namagnesowania $\mu_0 M$ [$T = \mu_0 M$] ma wymiar gęstości energii [J/m^3]. Całkowita gęstość energii ferromagnetyka jest sumą energii oddziaływania z zewnętrznym polem magnetycznym (tzw. energia Zeemana), energii anizotropii magnetycznej, energii odmagnesowania związanej z kształtem ferromagnetyka oraz energii sprężenia powierzchniowego.

W przypadku pojedynczej cienkiej warstwy ferromagnetyka i przy uproszczonym założeniu pojedynczej domeny, do opisanego funkcji gęstości energii zależnej od pola magnetycznego H wystarczy równanie:

$$E(\theta) = -\mu_0 M_s H \cos(\theta) - K_U \cos^2(\theta - \alpha) \quad (1)$$

gdzie: $\mu_0 M_s$ jest namagnesowaniem nasycenia, θ jest kątem między wektorem namagnesowania a kierunkiem pola H , K_U jest energią anizotropii jednoosiowej, α jest kierunkiem osi tej anizotropii. Wektor magnetyzacji M będzie dążył do takiego kąta θ_0 , aby całkowita energia osiągnęła lokalne minimum; łatwo udowodnić analitycznie, licząc pochodną $dE/d\theta$, że dla $\alpha = 0$ (oś łatwa anizotropii) pochodna energii się zeruje dla kąta θ_0 wynoszącego 0° bądź 180° .

W przypadku osi trudnej $\alpha = \pi/2$, pochodna wzoru (1) zeruje się dla $\cos(\theta_0) = (\mu_0 M_S / 2K_U) H$, czyli lokalne minimum energii przesuwa się wraz ze wzrostem pola H , co zgodnie z definicją namagnesowania:

$$M = M_S \cos(\theta_0) \quad (2)$$

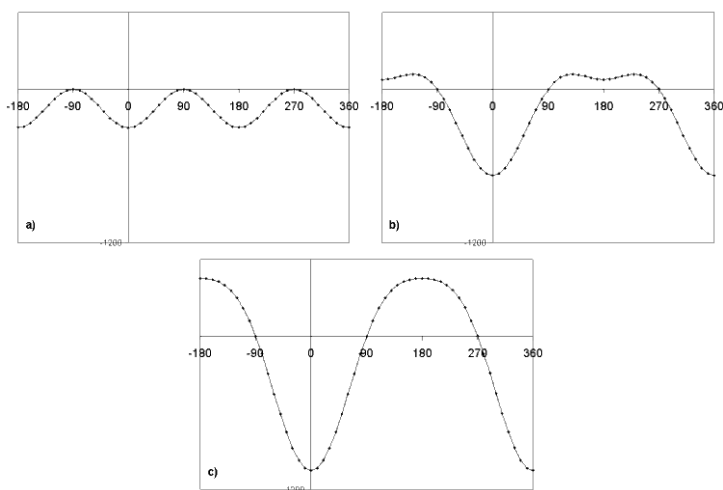
daje liniową zależność namagnesowania od pola H .

Ta właśnie połowa zależność kąta wektora namagnesowania determinuje charakterystyki magnetyczne i magnetorezystancyjne cienkiej warstwy lub układu wielowarstwowego.

Zadania do wykonania:

- ⇒ Przy użyciu formuły (1) należy w arkuszu kalkulacyjnym obliczyć zależność energii od kąta θ i wykonać wykres, dla kierunku osi łatwej ($\alpha = 0$). Do obliczeń można przyjąć na przykład $\mu_0 M_S = 1.5$ [T], $K_U = 300$ [J/m³].
- ⇒ Zmniejszając wartość pola H , od $H > H_C$ do $H < -H_C$, gdzie $H_C = 2K_U/M_S$ jest polem krytycznym (tzw. pole koercji), odnotować położenia lokalnego minimum θ_0 i zrobić wykres zależności magnetyzacji $M(H)$ obliczonej z definicji (2).
- ⇒ Powtórzyć powyższą procedurę dla pola zmieniającego się w przeciwną stronę, to jest rosnącego od $H < -H_C$ do $H > H_C$ i wykreślić drugą gałąź histerezy magnetycznej $M(H)$.
- ⇒ Powtórzyć obliczanie funkcji gęstości energii (1) dla różnych pól H w przypadku pola w kierunku osi trudnej ($\alpha = \pi/2$).

Poniżej podano przykład obliczeń kształtu funkcji (1) dla pola (a) $H = 0$ (dwa równoważne stany wektora namagnesowania), (b) $0 < H < H_C$ (jeden ze stanów, $\theta_0 = 180^\circ$, jest stanem metastabilnym) oraz (c) $H > H_C$ (możliwy tylko jeden stacjonarny stan układu $\theta_0 = 0^\circ$).



Rys. 1. Energia dla pola a) $H=0$, b) $H=250$ A/m, c) $H=500$ A/m.

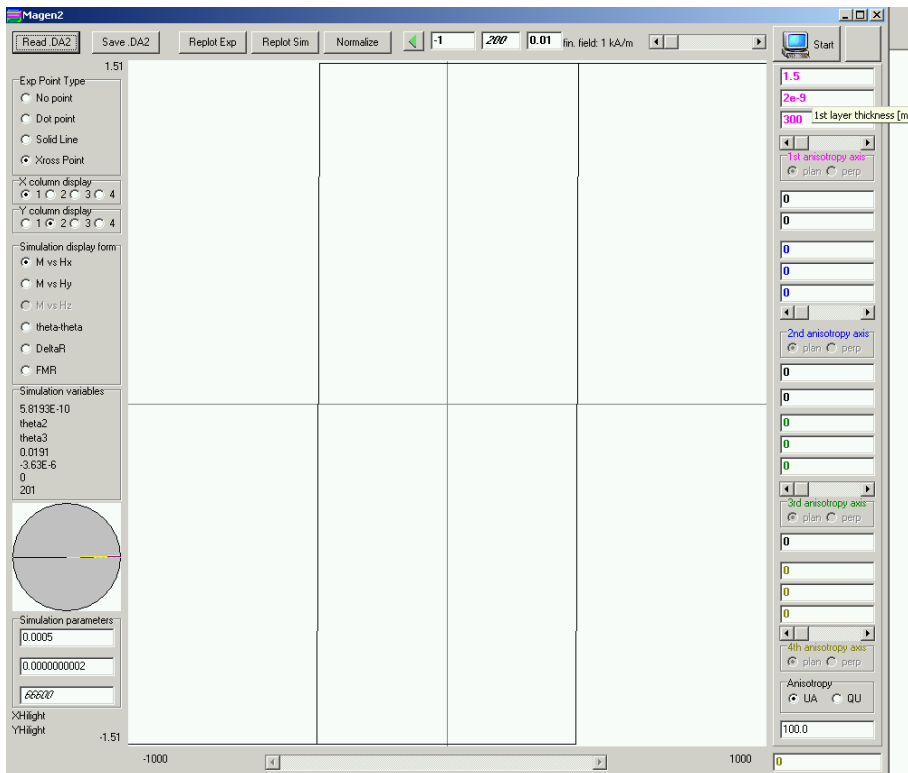
Ad 2. Narzędzie symulacyjne - program MAGEN2

Program MAGEN2, którego podstawy obliczeniowe oparte są na uproszczonym jednodomenowym modelu opisanym w rozdziale 1, powstał w celu szybkiego symulowania wpływu parametrów fizycznych (magnetyzacja, grubość, anizotropia, sprzężenia międzywarstwowe) na proces przemagnesowania wielowarstwowego układu cienkich warstw ferromagnetycznych.

Okno programu składa się z:

- górnego paska klawiszy sterujących oraz definicji zakresu pola magnetycznego,
- lewego panelu opcji i graficznej prezentacji wektorów namagnesowań,
- pola na którym wykresiany jest symulowany bądź wczytany z pliku wykres $M(H)$ lub $R(H)$,
- czterech paneli z parametrami fizycznymi poszczególnych warstw magnetycznych.

W najprostszym przypadku pojedynczej cienkiej warstwy ferromagnetyka, definiujemy tylko jej parametry w pierwszym panelu, w pozostałych panelach wpisujemy zera.



Rys. 2. Ekran programu MAGEN2 z symulacją pętli histerezy pojedynczej warstwy ferromagnetycznej.

W powyższym przykładzie wpisano:

- namagnesowanie nasycenia $M_S = 1.5$ [T],
- grubość warstwy $t = 2 \cdot 10^{-9}$ [m],
- anizotropię jednoosiową $K_U = 300$ [J/m³].

Po najechaniu kursorem na pole, pojawia się podpowiedź jaki parametr należy wpisać oraz w jakich jednostkach. Można też zdefiniować kąt osi anizotropii za pomocą suwaka w zakresie 0-90 stopni względem kierunku pola. W przypadku układu wielowarstwowego należy też zdefiniować energię powierzchniową sprzężenia biliniowego między poszczególnymi warstwami.


Zmianę pola H definiuje się w następujący sposób:


- wpisuje się wartość początkową pola H_{init} ,
- wpisuje się liczbę kroków N ,
- wpisuje się skok pola dH ,
- końcowa wartość pola liczona jest automatycznie jako $H_{fin} = H_{init} + N \cdot dH$.

W powyższym przykładzie zdefiniowano 200 kroków zmiany pola od -1000 do 1000 A/m.

Po wpisaniu parametrów można uruchomić symulację klawiszem .

W trakcie i po wykonaniu symulacji program wyświetla jedną gałąź histerezy magnetycznej (tzw. *forward branch*).

Z pomocą klawisza  można natychmiast uruchomić odwrotną procedurę zmiany pola i otrzymać drugą gałąź histerezy magnetycznej (*backward branch*).

Wynik symulacji można zapisać klawiszem  w formie pliku tekstowego w którym kolejne kolumny oznaczają:

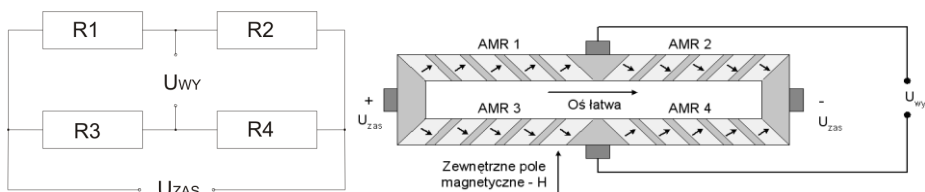
Natężenie pole magnetycznego [A/m], indukowana magnetyzacja [T], kąt1 [rad], kąt2 [rad], kąt3 [rad], kąt4 [rad], rezystancja [Ohm] i częstotliwość FMR (nie będąca tematem tych ćwiczeń).

Zadania do wykonania:

- ⇒ Uruchomić program i dla podanych wyżej parametrów wykonać symulację procesu przemagnesowania dla pola prostopadłego do osi anizotropii (tzw. oś trudna $\alpha = \pi/2$). Zapisać wynik na dysk i przejść do punktu Ad 3.

Ad 3. Odtworzenie odpowiedzi połowej magnetorezystancyjnego układu mostkowego AMR

Mostek AMR (*Anisotropic Magnetoresistance*) zbudowany jest z czterech magnetorezystorów $R_1 \dots R_4$ połączonych w układzie mostka Wheatstone'a:



Rys. 3. Schemat mostka i jego aplikacja - mostek AMR z elementami *Barber-pole*.

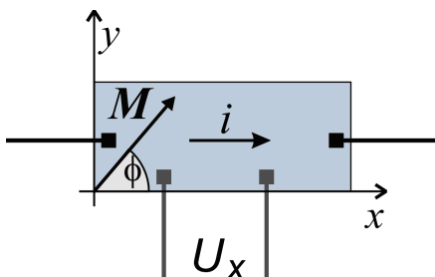
Napięcie na wyjściu takiego nieobciążonego prądowo mostka, wynosi

$$U_{wy} = \left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_3}{R_4 + R_3} \right) U_{zas} \quad (3)$$

Jeżeli magnetorezystory R_1 i R_4 oraz R_2 i R_3 są ze sobą sparowane, natomiast pary R_1 i R_3 oraz R_2 i R_4 są komplementarne (ich odpowiedzi napięciowe na zmianę pola są przeciwne, czyli gdy zmiana R_1 wynosi ΔR , to zmiana R_2 jest przeciwna: $-\Delta R$), wtedy odpowiedź napięciowa mostka $U_{wy}(H) = U_{zas} \cdot \Delta R/R$. Magnetorezystory użyte w tym mostku wykazują anizotropową magnetorezystancję AMR. Efekt ten polega, jak sama nazwa wskazuje, na różnicy w przewodności ferromagnetyka w zależności od kierunku przepływu prądu względem kierunku namagnesowania. W przypadku pola magnetycznego leżącego w płaszczyźnie cienkiej warstwy ferromagnetyka spadek napięcia będzie proporcjonalny do rezystancji zgodnie ze wzorem:

$$R = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2(\phi) \quad (4)$$

gdzie R_{\perp} jest rezystancją przy prądzie prostopadłym do namagnesowania, R_{\parallel} jest rezystancją przy prądzie równoległym do namagnesowania, ϕ jest kątem między namagnesowaniem a prądem jak na rysunku:

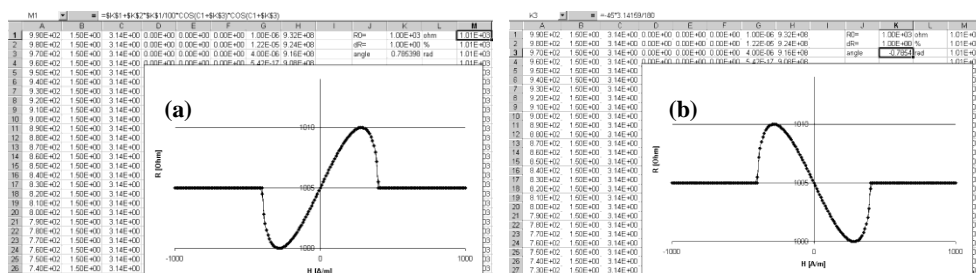


Rys. 4. Definicja pomiaru efektu AMR.

W celu linearyzacji charakterystyki $R(H)$ elementy AMR zostały wykonane w strukturze tzw. *Barber-pole* [4, 5], czyli posiadają naniesione na magnetyczną strukturę dodatkowe przewodzące elektrody, wymuszające przepływ prądu pod kątem 45° do osi anizotropii (rys. 3). W takim przypadku wzór (4) należy zmodyfikować dopisując kąt β pod którym wymuszany jest przepływ prądu:

$$R = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cos^2(\phi + \beta) \quad (5)$$

W celu uzyskania charakterystyki elementów AMR1 i AMR4 należy we wzorze 5 użyć kąt $\beta = 45^\circ$ (rys. 5 a), a w przypadku AMR2, AMR3: $\beta = -45^\circ$ (rys. 5 b):



Rys. 5. Przykład obliczenia charakterystyki $R(H)$ dla: a) „dodatniego” i b) „ujemnego” elementu *Barber pole*.

Zadania do wykonania:

- ⇒ Korzystając z pliku wynikowego otrzymanego w punkcie Ad 2 (przemagnesowanie wzdłuż osi trudnej) wykonać wykres rezystancji AMR1 i AMR 2 od pola H (wzór 5).
- ⇒ Wartości rezystancji użyć do wyznaczenia odpowiedzi napięciowej mostka (wzór 3) na zmianę pola magnetycznego H i porównać z charakterystyką zmierzoną w poprzednich ćwiczeniach (ćw. 2) lub z danymi katalogowymi.

Ad 4. Symulacja charakterystyk namagnesowania i magnetorezystancyjnych GMR w układach wielowarstwowych

Układy wielowarstwowe – szukanie minimum energii metodą gradientową

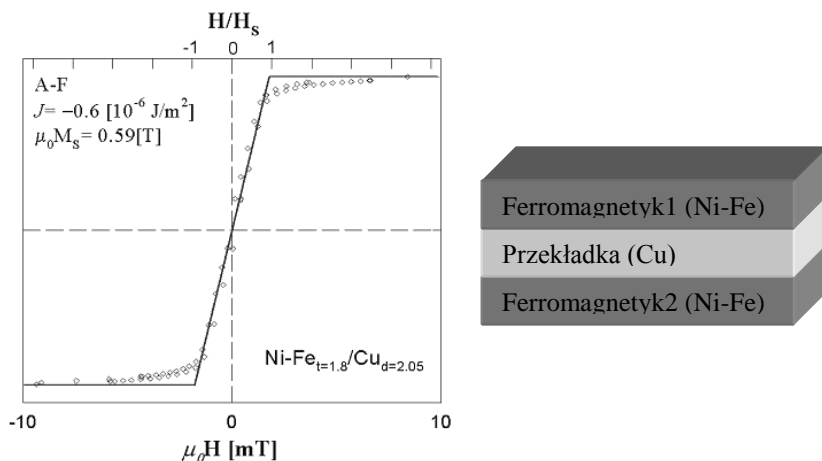
W przypadku gdy chcemy symulować zachowanie się niejednorodnego układu (np. ferromagnetyk podzielony na domeny lub układ złożony z kilku różnych warstw magnetycznych), gęstość energii będzie funkcją wielu zmiennych $E(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ i analityczne szukanie minimum jest bardzo trudne. Dlatego trzeba użyć metod numerycznych, na przykład metody gradientu.

Gradient energii potencjalnej jest przeciwnie skierowany do wektora działającej siły: $\nabla E = -\mathbf{F}$, więc wystarczy policzyć pochodne cząstkowe $\partial E / \partial \theta_i$, stworzyć z nich wektor i przesunąć się o niewielki krok w przeciwnym kierunku niż ten wektor. Powtarzając wielokrotnie tę procedurę znajdziemy się prędzej czy później w obszarze lokalnego minimum, gdzie wszystkie pochodne będą mniejsze niż założone kryterium zatrzymania symulacji. Tak właśnie działa program MAGEN2 wykorzystywany do symulacji w tym ćwiczeniu, a także wiele innych bardziej złożonych programów, np. Object Oriented MicroMagnetic Framework OOMMF.

Jeśli zostaniemy przy prostym modelu „jedna warstwa - jedna domena”, to funkcję powierzchniowej gęstości energii dla układu złożonego z dwóch warstw ferromagnetycznych oddzielonych przekładką nieferromagnetyczną (np. metaliczna - miedź, izolacyjna - tlenek magnezu) można zapisać tak:

$$E(\theta_1, \theta_2) = -\mu_0 M_{s1} H t_1 \cos(\theta_1) - K_{U1} t_1 \cos^2(\theta_1 - \alpha_1) - \mu_0 M_{s2} H t_2 \cos(\theta_2) - K_{U2} t_2 \cos^2(\theta_2 - \alpha_2) - J_{12} \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

gdzie t_i jest grubością i -tej warstwy a J_{12} [J/m²] jest energią sprzężenia między powierzchniami sąsiadujących warstw, determinującą wzajemne ustawienie obu wektorów namagnesowania. W przypadku gdy stała $J_{12} > 0$, wektory magnetyzacji dążą do równoległego ustawienia względem siebie, w przypadku $J_{12} < 0$, do antyrównoległego. Antyrównoległe ustawienie wektorów namagnesowania w przypadku identycznych warstw oznacza wyzerowanie efektywnej magnetyzacji próbki. Na rysunku 6 przedstawiono przykład symulacji z użyciem modelu (6) na tle rzeczywistego pomiaru $M(H)$ próbki Ni-Fe/Cu/Ni-Fe.



Rys. 6. Przykładowa charakterystyka $M(H)$ (dla znormalizowanej magnetyzacji M) w przypadku sprzężenia antyferromagnetycznego $J_{12} < 0$ oraz struktura próbki.

W przypadku układów z większą liczbą warstw, do wzoru (6) wystarczy dołożyć dodatkowe człony energii Zeemana, anizotropii i sprzężenia międzywarstwowego. Jako przykład posłuży tzw. zawór spinowy, złożony z rozdzielonych przekładką niemagnetyczną dwóch warstw ferromagnetycznych, druga warstwa ferromagnetyczna naniesiona jest na warstwę tzw. antyferromagnetyka:

$$E(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = -\mu_0 M_{s1} H t_1 \cos(\theta_1) - K_{U1} t_1 \cos^2(\theta_1 - \alpha_1) - \mu_0 M_{s2} H t_2 \cos(\theta_2) - K_{U2} t_2 \cos^2(\theta_2 - \alpha_2) - J_{12} \cos(\theta_1 - \theta_2) - K_{U3} t_3 \cos^2(\theta_3 - \alpha_3) - J_{23} \cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (7)$$

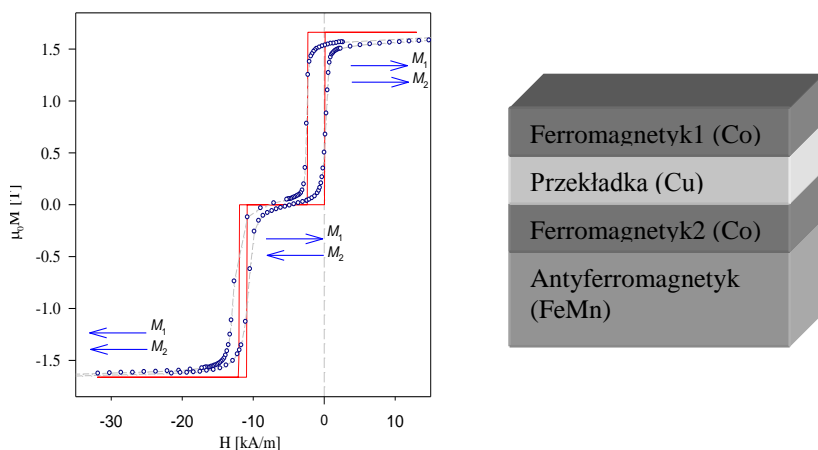
W powyższym wzorze brakuje członu energii zeemanowskiej dla trzeciej warstwy, ponieważ antyferromagnetyk jest materiałem, którego całkowite namagnesowanie wynosi zero. Odpowiednia obróbka termiczna (tzw. *field cooling*) pozwala na uzyskanie efektu podmagnesowania (*bias*) drugiej warstwy ferromagnetycznej. Przykład obliczeń i rzeczy-

wistego pomiaru dla próbki Co/Cu/Co/FeMn przedstawia rysunek 7. Do pomiaru dopasowano wartości:

$$K_{U_1} = 580 \text{ J/m}^3, J_{12} = 7.9 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2, J_{23} = 94 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2.$$

Jak widać, układ ten posiada niesymetryczną charakterystykę $M(H)$, podobnie jak dioda ma niesymetryczną charakterystykę $I(U)$, stąd nazwa „zawór spinowy”.

Przemagnesowanie zaworu spinowego odbywa się dwuetapowo – jedna pętla histerezy blisko $H=0$ (przemagnesowanie pierwszej warstwy, tzw. swobodnej) oraz druga w silnie ujemnym polu (przemagnesowanie drugiej warstwy, tzw. zamocowanej). Dzięki takiemu efektowi kierunki namagnesowań warstwy zamocowanej i swobodnej są antyrównoległe w ujemnym obszarze pola między pętlami. Przy przejściu przez zero pola obraca się tylko warstwa swobodna, co ma istotne znaczenie dla zastosowań jako magnetorezystancyjny czujnik pola.



Rys. 7. Przykładowa charakterystyka $M(H)$ zaworu spinowego Co/Cu/Co/FeMn i jego struktura.

Efekty GMR, TMR

Efekt *Giant Magneto-Resistance* (GMR) zachodzi przy przepływie prądu przez układ warstw ferromagnetycznych oddzielonych nieferromagnetyczną przekładką metaliczną. Zmiana rezystancji następuje, gdy zmienia się różnica kąta między namagnesowaniami sąsiednich warstw, zgodnie ze wzorem:

$$R = R_{\uparrow\uparrow} + \frac{R_{\downarrow\uparrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{2} [1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (8)$$

gdzie $R_{\uparrow\uparrow}$ jest rezystancją przy równoległym położeniu wektorów namagnesowań (różnica kątów $\theta_1 - \theta_2 = 0$), $R_{\downarrow\uparrow}$ jest rezystancją przy antyrównoległym położeniu wektorów namagnesowań (różnica kątów 180°). Jedną z metod wymuszenia wzajemnie antyrównoległego ułożenia magnetyzacji jest takie dobranie grubości przekładki nieferromagnetycznej,

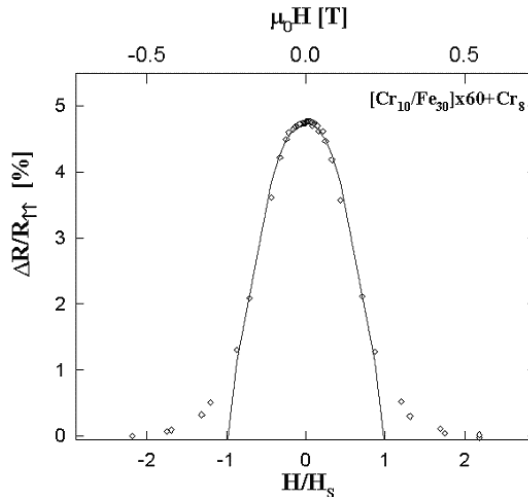
aby powstało ujemne sprzężenie wymienne między warstwami ferromagnetycznymi (stała $J_{12} < 0$ we wzorze 6). Ponieważ przy identycznych warstwach kąty ich namagnesowań są symetrycznie przekręcone względem kierunku pola: $\theta_1 = -\theta_2$, to w tym przypadku wzór (8) zredukuje się do

$$R = R_{\downarrow\uparrow} - (R_{\downarrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}) \cos^2(\theta) \quad (9)$$

co przy liniowej zależności namagnesowania:

$$M(H) = M_s \cos(\theta_1) = M_s \cos(\theta_2) \quad (10)$$

od pola H (rys. 6) daje zależność paraboliczną, przedstawioną na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyka $R(H)$ odpowiadająca charakterystyce $M(H)$ z rysunku 6.

Symetryczna paraboliczna charakterystyka może być niekorzystna z punktu widzenia zastosowań w czujnikach małych pól. Aby zmodyfikować charakterystykę, można zastosować zawór spinowy (modelowany wzorem 7).

Czułość efektu magnetorezystancyjnego można wzmocnić, stosując efekt tunelowej magnetorezystancji (*Tunneling Magnetoresistance* TMR), występujący w przypadku dwóch warstw ferromagnetycznych oddzielonych cienką (1 – 2 nm) warstwą izolatora, np. Al_2O_3 , MgO. Wartość prądu tunelowego zależy od wzajemnego kierunku namagnesowań obu elektrod ferromagnetycznych, co w rezultacie daje efektywną rezystancję zależną od różnicy kątów wektorów namagnesowań analogicznie jak we wzorze (6) dla efektu GMR. Różnicą jest inny fizyczny mechanizm – spinowo zależne tunelowanie przez izolator w efekcie TMR, zamiast spinowo zależnego rozpraszania elektronów przewodnictwa

w efekcie GMR. Efekt TMR jest znacznie silniejszy (większa różnica $\Delta R = R_{\downarrow\uparrow} - R_{\uparrow\uparrow}$) niż GMR, ale wymaga bardziej zaawansowanej technologii.

Zadania do wykonania:

- ⇒ Uruchomić program MAGEN2 i wykonać symulację przemagnesowania $M(H)$ dla układu wielowarstwowego ze sprzężeniem antyferromagnetycznym, przyjmując dane takie jak na rys. 6 ($K_U = 0$). Wyniki zapisać do pliku.
- ⇒ Używając kątów obliczonych w poprzedniej procedurze, wykonać wykres $R(H)$ dla 5% GMR = $(R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow})/R_{\uparrow\uparrow}$.
- ⇒ Uruchomić program MAGEN2 i wykonać symulację przemagnesowania $M(H)$ dla zaworu spinowego, dane poda prowadzący ćwiczenia, przykład wprowadzania danych na rysunku 9.
- ⇒ Używając obliczonych w poprzedniej procedurze kątów, narysować wykres $R(H)$ dla 150% TMR = $(R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow})/R_{\uparrow\uparrow}$.
- ⇒ Zmieniając poszczególne parametry fizyczne warstw, sprawdzić jaki wpływ na kształt pętli histerezy $M(H)$ ma:
 - a) energia anizotropii warstwy swobodnej K_{U1} (zwiększyć 10x),
 - b) wymienna energia sprzężenia J_{12} warstwy swobodnej do zamocowanej (zwiększyć 10x),
 - c) wymienna energia sprzężenia warstwy zamocowanej do antyferromagnetycznej J_{23} *exchange bias* (zwiększyć 2x),
 - d) grubość ferromagnetyka (zmniejszyć 10x),
 - e) kierunek pola H (zmienić o 90°).

Ad 5. Szukanie parametrów na podstawie zmierzonych uprzednio charakterystyk

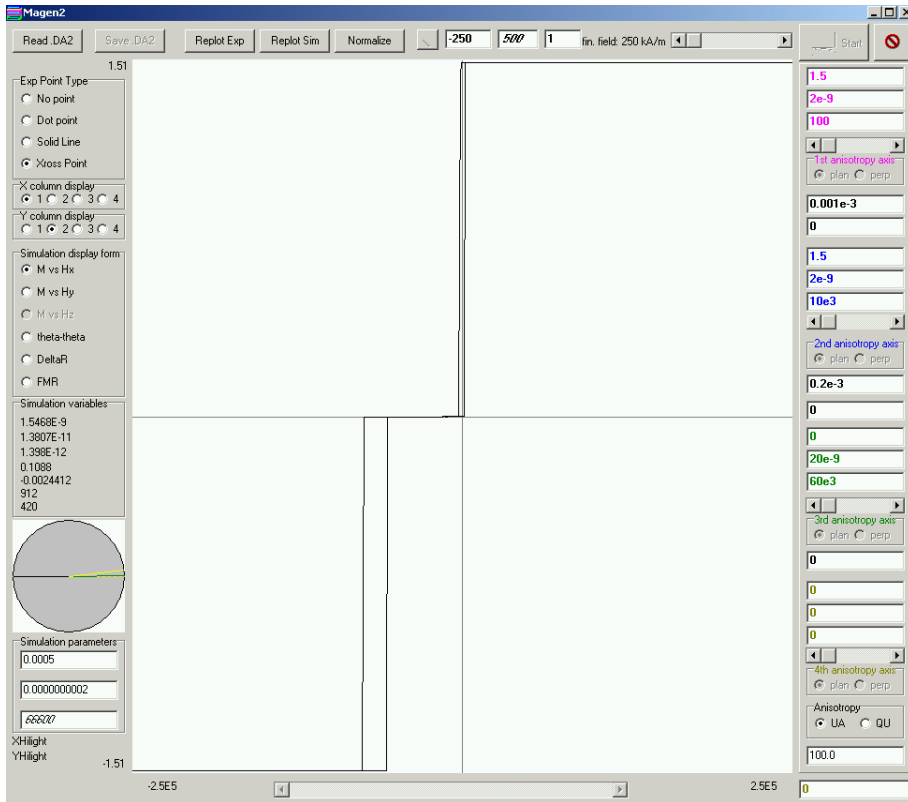
Zadania do wykonania:

- ⇒ Dopasować nieznane wartości parametrów dla rzeczywistej struktury warstwowej użytej w elemencie magnetorezystancyjnym (wskazanym przez prowadzącego zajęcia). Należy znaleźć takie parametry fizyczne, aby wykres generowany przez program MAGEN2 był podobny do zmierzonej rzeczywistej charakterystyki.

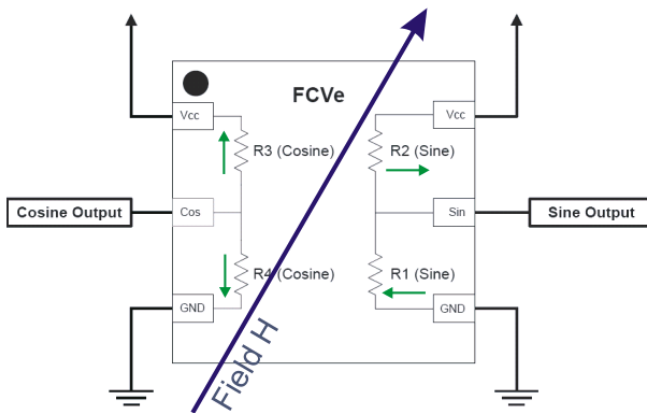
Ad 6. Odtworzenie odpowiedzi kątovej czujnika opartego na zaworze spinowym TMR

Czujnik typu AAT składa się z dwóch niezależnych potencjometrycznych gałęzi mostka, w jednej gałęzi znajdują się dwa przeciwsojne elementy typu zawór spinowy z anizotropią jednozwrotową, R_3 i R_4 , wykazujące efekt tunelowej magnetorezystancji TMR, w drugiej gałęzi znajdują się podobne elementy R_1 i R_2 , ale z osią anizotropii tworzącą kąt 90° względem osi pierwszej gałęzi.

Ćw. 7 – Symulacje numeryczne charakterystyk czujników magneto rezystancyjnych



Rys. 9. Okno programu MAGEN2 z charakterystyką $M(H)$ zaworu spinowego.



Rys. 10. Schemat czujnika kąta typu AAT firmy NVE z zaznaczonymi kierunkami anizotropii.

Zasadą działania czujnika jest założenie, iż w wyniku rotacji pola H zmienia się kąt magnetyzacji warstwy swobodnej, natomiast magnetyzacja warstwy zamocowanej nie ulega zmianie, więc ze wzoru (8) powinniśmy otrzymać rezystancję takiego elementu jako funkcję trygonometryczną kąta pola H przesuniętą w fazie o kąt osi anizotropii jednozwrutowej.

Celem ćwiczenia jest wykonanie symulacji działania jednego z czterech elementów TMR czujnika kąta, przy założeniu parametrów zaworu spinowego które poda prowadzący ćwiczenie.

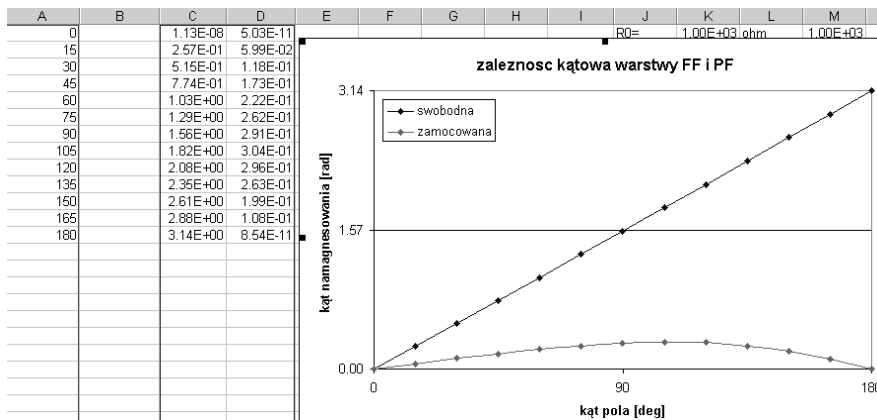
Zadania do wykonania:

- ⇒ Używając programu MAGEN2 należy dokonać szeregu symulacji dla pola o stałej (optymalnej dla pracy czujnika) wartości 20kA/m (jeden krok iteracji pola) i kącie α (*field angle*) zmieniającym się od 0° do 180° z krokiem co 15 stopni (rys. 11).
- ⇒ Każdy krok symulacji należy zapisać na dysk.



Rys. 11. Sposób symulacji kątowej przy stałym polu 20 kA/m.

- ⇒ Obliczone kąty pierwszej i drugiej warstwy (3 i 4 kolumna drugiego wiersza w pliku każdej symulacji) należy skopiować do arkusza kalkulacyjnego i narysować zależności kątowe:

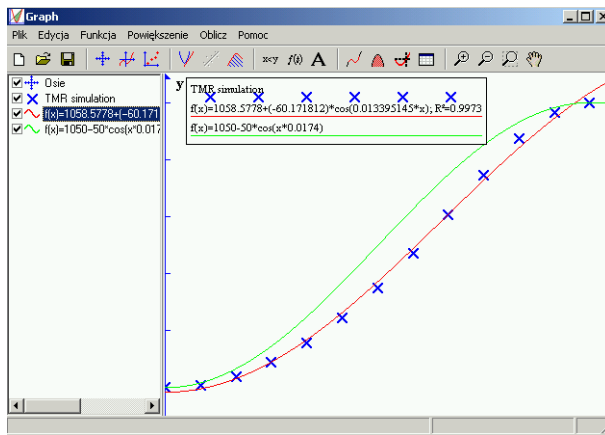


Rys. 12. Wykres zależności kątów namagnesowań od kąta α przyłożenia pola H .

- ⇒ Na podstawie otrzymanych z symulacji kątów obliczyć magnetorezystancję TMR zgodnie ze wzorem (8)
- ⇒ Narysować wykres $R(\alpha)$, używając programu graficzno-analitycznego typu Origin, SigmaPlot, KDE LabPlot, PadawanGraph lub innego, posiadającego opcję regresji nieliniowej.

Ćw. 7 – Symulacje numeryczne charakterystyk czujników magnetorezystancyjnych

- ⇒ Dopasować funkcję typu $y=A+B\cos(Cx)$ do wyliczonych wartości rezystancji (rys. 13) i oszacować niezgodność z teoretycznym wzorem (8) który powinien dać odpowiedź cosinus lub sinus, gdy kąt warstwy zamocowanej wynosi 0° lub 90° stopni a kąt warstwy swobodnej rotuje wraz z polem.
- ⇒ Należy też narysować taki wykres ze wzoru (8) i porównać graficznie z obliczonymi wartościami $R(\alpha)$.
- ⇒ Powyższe procedury należy powtórzyć dla bardzo małego pola np. 500 A/m oraz bardzo dużego pola, np. 100 kA/m.
- ⇒ Uzasadnić, dlaczego czujnik kąta źle pracuje poza obszarem znamionowych pól pracy.



Rys. 13. Wykresy $R(x)$ i przykłady dopasowania funkcji $\cos(x)$, gdzie x jest kątem α pola H .

Wykaz aparatury

1. Komputer z programem MAGNE2 oraz arkuszem kalkulacyjnym i programem graficzno-analitycznym.

Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Elektroniki

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Egzemplarz bezpłatny

Wydawnictwa AGH, Kraków 2010

ISBN 978-83-7464-350-4