



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ELEKTRONIKI I INFORMATYKI

Praca dyplomowa magisterska

Konduktometr do pomiarów dynamicznych

Dyplomant: Kleszczewski Rafał
Kierujący pracą: dr inż. Józef Wiora

Gliwice, czerwiec 2011

Spis treści

Spis rysunków	5
Wykaz symboli	7
Rozdział 1. Wprowadzenie	9
1.1. Wstęp	9
1.2. Cel i zakres pracy	10
Rozdział 2. Podstawy teoretyczne	11
2.1. Co to jest konduktometria?	11
2.2. Historia rozwoju konduktometrii	13
2.3. Zastosowania konduktometrii	15
2.4. Metoda znacznikowa	19
2.4.1. Metoda określania czasu przejścia	20
2.4.2. Metoda rozcieńczenia	20
Rozdział 3. Cześć elektroniczna	23
3.1. Przetwornik rezystancja-napięcie	23
3.2. Układ mikroprocesorowy	28
3.2.1. Mikrokontroler i przetwornik ADC	28
3.2.2. Układ komunikacji z komputerem	30
3.2.3. Konwerter i podwajacz napięcia	31
3.2.4. Detektor wartości szczytowej	32
Rozdział 4. Oprogramowanie	35
4.1. Układ mikroprocesorowy	35
4.2. Odczyt i magazynowanie danych	37
Rozdział 5. Działanie konduktometru	39
5.1. Wyznaczenie czasu odpowiedzi (czasu reakcji) układu	39
5.2. Sprawdzenie działania	42

Rozdział 6. Wnioski z pracy	45
6.1. Podsumowanie	45
6.2. Możliwości rozwoju projektu	46
Bibliografia	49
Dodatek A. Dane pomiarowe	51
Dodatek B. Schematy elektryczne	57
Dodatek C. Schematy i rysunki z LabVIEW	59
Dodatek D. Listing programu	63

Spis rysunków

2.1	Zasada pomiaru konduktometrycznego	12
2.2	Przepływ prądu przez krwinkę i otaczający ją płyn zewnątrzkomórkowy	17
2.3	Zależność konduktancji mleka i śmietany w funkcji częstotliwości od zawartości tłuszczu	18
2.4	Przebieg zmian konduktywności roztworu cukrowo-wapniowego w funkcji stężenia sacharozy	19
2.5	Schemat pomiaru natężenia przepływu medium metodą dwóch punktów	21
2.6	Schemat pomiaru natężenia przepływu medium metodą rozcieńczenia	21
3.1	Ogólny schemat blokowy konduktometru do pomiarów dynamicznych	23
3.2	Schemat układu przetwornika rezystancja-napięcie	24
3.3	Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza $\mu A741$	25
3.4	Charakterystyka fazowa wzmacniacza $\mu A741$	25
3.5	Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza AD817	26
3.6	Charakterystyka fazowa wzmacniacza AD817	27
3.7	Schemat elektryczny przetwornika rezystancja-napięcie w oparciu o układ scalony AD817	27
3.8	Widok gotowego układu mikroprocesorowego	28
3.9	Schemat zasilanie układu ATmegi i ADC oraz podłączenie przycisku RESET	29
3.10	Schemat układu komunikacji z komputerem	31
3.11	Schemat układu służącego do podwyższania i zmiany polaryzacji napięcia	31
3.12	Schemat elektryczny detektora wartości szczytowej	32
3.13	Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 5 \text{ V}$	33
3.14	Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 2 \text{ V}$	33
3.15	Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 400 \text{ mV}$	34

4.1	Schemat blokowy przedstawiający działanie programu mikroprocesora	36
4.2	Widok panelu czołowego programu służącego do zapisu danych do pliku	38
5.1	Sposób wyznaczania czasu reakcji dla narastania na podstawie danych pomiarowych w postaci cyfrowej	40
5.2	Sposób wyznaczania czasu reakcji dla narastania na podstawie danych pomiarowych w postaci cyfrowej (zbliżenie)	41
5.3	Fragmenty plików przedstawiające działanie układu konduktometru dla różnych wzmocnień	43
6.1	Schemat układu komunikacji z wykorzystaniem układu FT232RL	47
6.2	Schemat podłączenia zasilania oraz gniazda programatora do układu ATmega16L	48
B.1	Mozaika ścieżek układu mikroprocesorowego	57
B.2	Schemat elektryczny układu mikroprocesorowego	58
C.1	Schemat blokowy programu do zapisu danych do pliku	59
C.2	Część panelu czołowego programu służącego do wyznaczania czasu reakcji odpowiedzialna za generowanie sygnału	60
C.3	Część panelu czołowego programu służącego do wyznaczania czasu reakcji odpowiedzialna za pomiar danych wejściowych	60
C.4	Schemat blokowy programu służącego do wyznaczania czasu reakcji	61

Wykaz symboli

symbol	nazwa	jednostka	strona
R	rezystancja przewodnika	Ω	11
l	długość przewodnika	m	11
s_1	pole przekroju przewodnika	m^2	11
ρ	opór właściwy (rezystywność)	$\Omega \cdot \text{m}$	12
κ	przewodnictwo właściwe	$\text{S} \cdot \text{m}$	12
k	stała naczynka konduktometrycznego	m^{-1}	13
s_2	pole przekroju rurociągu	m^2	20
v	objętościowe natężenie przepływu medium	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	20
V	objętość cieczy znajdującej się pomiędzy płaszczyznami punktów pomiarowych	m^3	20
L	odległość punktów pomiarowych	m	20
t	czas przejścia pomiędzy punktami pomiarowymi	s	20
v_1	objętościowe natężenie przepływu znacznika	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	21
v_2	objętościowe natężenie przepływu medium przed wstrzyknięciem znacznika	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	21
C_1	stężenie znacznika	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	21
C_2	stężenie medium przed wstrzyknięciem znacznika	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	21
R_c	rezystancja celki konduktometrycznej	Ω	24
R_s	rezystancja sprzężenia zwrotnego układu przetwornika rezystancja-napięcie	Ω	24

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Konduktometria jest dziedziną elektrochemii zajmującą się pomiarem przewodności elektrycznej cieczy. Początek jej sięga drugiej połowy XIX w. Podobnie jak inne dziedziny nauki i przemysłu, także konduktometria rozwinęła się w bardzo dużym stopniu. Obecnie na rynku jest bardzo wiele urządzeń o wysokiej dokładności, służących do pomiaru przewodności elektrycznej cieczy. Przedmiotem tej pracy nie będzie jednak zbudowanie konduktometru podobnego do tych istniejących, tylko urządzenia które bardziej można nazwać detektorem pozwalającym na szybkie wykrycie zmian przewodności w dwóch różnych miejscach kanału otwartego. Stawiane wymagania oraz cel realizowanego projektu został szczegółowo przedstawiony w rozdziale 1.

W celu wprowadzenia czytelnika w problematykę pracy w rozdziale 2 zostały opisane związane z nią podstawowe zagadnienia teoretyczne. Przedstawiono również krótko historię rozwoju konduktometrii. Aby pokazać sens zajmowania się tą dziedziną w celu jej dalszego rozwoju oraz jak ważna jest ona w naszym życiu zostały opisane również w tym rozdziale przykładowe i zarazem najbardziej popularne zastosowania konduktometrii.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi realizowanego projektu. W tej części pracy zostały przedstawione wszystkie wykonane podzespoły, ich budowa, działanie oraz funkcje jakie pełnią w realizowanym konduktometrze.

Część programowa została przedstawiona w rozdziale 4. Zawiera on ogólny schemat działania programu sterującego zamianą napięcia jako sygnału analogowego na postać cyfrową. Cały proces pomiaru został również szczegółowo opisany. Ponadto w rozdziale tym zaprezentowana została również aplikacja służąca do odczytywania i zapisu danych przesyłanych przez mikrokontroler do komputera.

Rozdział 5 przedstawia sprawdzenie działania całego konduktometru. Została w nim również opisana metoda wyznaczania parametrów dynamicznych zbudowanego konduktometru.

Ostatni rozdział 6 zawiera wnioski z realizowanej pracy oraz możliwości dalszego rozwoju projektu.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest zaprojektowanie i wykonanie urządzenia spełniającego rolę konduktometru do pomiarów dynamicznych. Układ powinien posiadać następujące cechy:

- możliwość wykonywania szybkich pomiarów,
- możliwość pomiaru sygnału z dwóch elektrod konduktometrycznych,
- komunikacja z komputerem za pomocą portu RS232,
- przenośność,
- możliwość zapisu danych do pliku.

Zakres pracy obejmuje:

- zaprojektowanie i wykonanie przetwornika rezystancja-napięcie,
- dobranie odpowiedniej częstotliwości sygnały wejściowego dla pomiaru konduktometrycznego,
- zaprojektowanie i wykonanie układu mikroprocesorowego konduktometru,
- zaprogramowanie urządzenia,
- wykonanie aplikacji do wizualizacji i zapisu danych do pliku,
- sprawdzenie poprawności działania konduktometru,
- wyznaczenie parametrów dynamicznych.

Rozdział 2

Podstawy teoretyczne

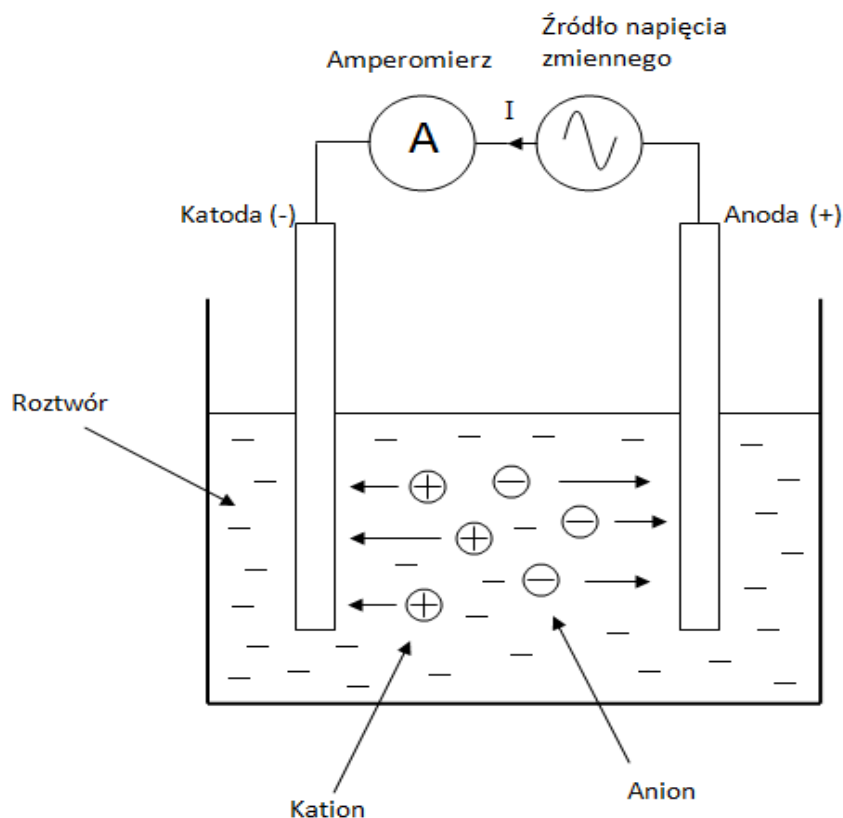
2.1. Co to jest konduktometria?

Konduktometria jest jedną z gałęzi elektrochemii zajmującą się badaniem przewodności roztworu (zazwyczaj jest to roztwór elektrolitu) pomiędzy dwoma elektrodami, którego wartość ulega zmianie wraz ze zmianą stężenia jonów znajdujących się w tym roztworze. W związku z tym, iż jest to metoda nieselektywna, można zbadać zmianę stężenia tylko jednego składnika. Charakteryzuje się ona również wieloma zaletami m.in. prostotą, dużą czułością oraz możliwością stosowania dla szerokiego zakresu stężeń, co sprawia, że jest często stosowana [4, 6]. Podobnie jak podczas pomiarów zawartości składników w różnych dziedzinach nauki także i tutaj podstawą do wyznaczenia przewodności elektrolitu jest oddziaływanie zewnętrznego pola elektrycznego na materię. Najczęściej stosuje się metodę zaproponowaną po raz pierwszy przez Kohlenrauscha, czyli zastosowanie zmiennego pola elektrycznego o częstotliwości nie większej niż 100 kHz. Najprościej ideę pomiaru konduktywności można przedstawić za pomocą rysunku 2.1.

Do zanurzonych w roztworze elektrolitu dwóch identycznych metalowych elektrod przykładamy zewnętrzne źródło napięcia zmiennego, w wyniku czego zachodzi proces dysocjacji roztworu na jony dodatnie, czyli kationy oraz jony ujemne, zwane anionami. Wówczas w roztworze dochodzi do przemieszczania się zdysocjowanych jonów. Dodatnie kationy poruszają się w kierunku katody, czyli ujemnej elektrody, natomiast aniony w kierunku elektrody dodatniej, którą jest anoda. W wyniku tych procesów w obwodzie elektrycznym pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego powstaje prąd elektryczny. Opisany proces związany z przemieszczaniem się jonów w roztworze nosi nazwę przewodnictwa elektrolitycznego lub konduktancją elektrolityczną [3, 5].

Opór elektryczny przewodników zależy przede wszystkim od jego rozmiarów, właściwości materiału, z którego dany przewodnik jest zbudowany oraz od temperatury i ciśnienia. Dla stałej wartości temperatury i ciśnienia spełniony jest w wzór:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s_1}. \quad (1)$$



RYSUNEK 2.1. Zasada pomiaru konduktometrycznego
opracowane na podstawie [3,5]

gdzie: R – rezystancja, Ω ; ρ – opór właściwy (rezystywność), $\Omega \cdot \text{m}$; l – długość przewodnika, m; s_1 – pole przekroju przewodnika, m^2 . Często używanymi jednostkami są również odpowiednio: $\Omega \cdot \text{cm}$, cm oraz cm^2 . Opór właściwy ρ jest to wielkość, która znacznie zależy od temperatury i niewiele od ciśnienia, stąd wymaganie o stałości temperatury i ciśnienia. Inaczej można powiedzieć, że jest to opór jaki stawia prądowi przewodnik o długości 1 cm i przekroju 1 cm^2 [7].

Innym parametrem, który charakteryzuje materiał przewodnika jest przewodnictwo właściwe, które opisuje zdolność roztworu elektrolitu do przewodzenia prądu elektrycznego, a liczbowo jest równe odwrotności oporu właściwego:

$$\kappa = \frac{1}{\rho}. \quad (2)$$

Jednostką przewodnictwa jest $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ lub $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$, gdzie S (Siemens) = Ω^{-1} . Często używaną jednostką przewodnictwa jest również $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Jest to przewodność słupka roztworu elektrolitu o długości 1 cm i polu przekroju 1 cm^{-1} [7].

W związku z tym, że trudno jest mierzyć odległość pomiędzy elektrodami oraz pole ich powierzchni, stosunek l/s_1 nazywa się stałą naczynka konduktometrycznego:

$$k = \frac{l}{s_1}, \quad (3)$$

którego jednostką jest m^{-1} . Wartość stałej k dla danego naczynka wyznacza się najczęściej metodą cechowania, stosując roztwór elektrolitu o znanym stężeniu [3]. Na podstawie wzorów (1), (2) oraz (3) można napisać [3, 6, 7]:

$$\kappa = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{s_1}. \quad (4)$$

2.2. Historia rozwoju konduktometrii

Pierwsze badania dotyczące przewodnictwa elektrolitycznego były prowadzone już w pierwszej połowie XIX w. przez Faradaya. Zajmował się on badaniem zjawisk zachodzących w roztworach po zanurzeniu w nich dwóch platynowych blaszek i podaniu stałego napięcia z zewnętrznego źródła prądu [3]. Jednak patrząc z perspektywy czasu największy wkład w rozwój konduktometrii ma niewątpliwie Friedrich Kohlenrausch. On jako pierwszy zastosował prąd zmienny w pomiarach przewodności elektrolitów, co pozwoliło mu na uzyskanie dokładnych wyników. W 1874 roku wykazał, że elektrolit ma określoną i stałą oporność elektryczną, i w związku z tym wprowadził pojęcie *stała czujnika*. Na podstawie przeprowadzonych badań podzielił roztwory elektrolitów na dwie grupy: *elektrolity mocne* np. HCl lub KCl oraz *elektrolity słabe* m.in. kwas octowy CH_3COOH . Kontynuatorami prac z zakresu konduktometrii byli głównie niemieccy uczeni: Wien oraz Holborn. Jednak osobą, która po Kohlenrauschu ma duży wkład do omawianej dziedziny jest Newbery. W 1918 roku jako pierwszy zastosował czteroelektrodową metodę pomiaru. Kolejnymi osobami, które mają swój wkład w rozwój konduktometrii są trzej amerykańscy naukowcy: Parker, Jones i Shedlowsky. Ich prace w latach dwudziestych i trzydziestych XX w. doprowadziły do zdecydowanego polepszenia właściwości mostków stosowanych do pomiarów konduktometrycznych ale nie tylko. Duży udział mają oni również w rozwoju czujników, szczególnie tych wzorcowych. Przeprowadzone badania pozwoliły na bezwzględne określenie wzorców konduktywności roztworów z dokładnością lepszą niż ta, którą uzyskał Kohlenrausch. Opracowane w latach trzydziestych przez Johnesa wzorce demalne KCl są do dziś używane w wielu krajach na całym świecie. Dokładność wzorców została dopiero poprawiona w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX w. [1, 3].

Dobrze znane wszystkim przysłowie „potrzeba matką wynalazków” sprawdziło się również w dziedzinie konduktometrii. Wraz z postępem badań w tej dziedzinie znalazła ona zastosowanie w przemyśle. Właśnie potrzeba stała się bodźcem do bardziej intensywnych prac. Nowością było wprowadzenie w 1951 roku przez Relysa bezelektrodowych czujników typu transformatorowego. Były one stosowane w zakresie małych częstotliwości. Wyeliminowało to występujące do tej pory takie niedogodności jak: występowanie impedancji elektrodowych, korodowanie elektrod a także duży wpływ zanieczyszczeń na wynik pomiaru. Zastosowanie tych czujników w trudnych warunkach przemysłowych sprawdziło się więc bardzo dobrze. Co prawda metoda pomiaru przewodności bez użycia elektrod, tylko że w zakresie dużych częstotliwości była znana już wcześniej jednak nie odegrała ona znaczącej roli w przemyśle jak ta opisana powyżej [1].

Podobnie jak w innych dziedzinach nauki, także i tutaj ogromne znaczenie dla postępu badań ma rozwój elektroniki oraz informatyki. Pozwala on ciągle doskonalić istniejące już przyrządy, a także wprowadzać nowe rozwiązania np. w zakresie poprawy dokładności czy miniaturyzacji urządzeń. Daje również możliwość praktycznego zastosowania różnych algorytmów służących do kompensacji temperaturowej, jakże ważnej w pomiarach konduktometrycznych. Ogromne znaczenie dla rozwoju konduktometrii ale i nie tylko miało zastosowanie w urządzeniach mikroprocesorów. Otworzyło to szerokie pole manewru zarówno dla konstruktorów urządzeń jak również znacznie ułatwiło pracę osobom obsługującym na co dzień taki sprzęt. Dzięki dostępowi coraz większej pamięci oraz możliwości programowania urządzeń stawały się one coraz dokładniejsze, bardziej inteligentne oraz posiadały coraz więcej nowych funkcji pomiarowych. Ważnym etapem rozwoju było pojawienie inteligentnego przetwornika konduktometrycznego niemieckiej firmy WTW GmbH & Co KG, który jest kompatybilny z innymi urządzeniami pomiarowymi i można go włączyć w każdy system pomiarowy. Jego dużą zaletą jest wielofunkcyjność i elastyczność [1].

Obecnie cały czas pracuje się nad tym aby produkowane czujniki i przetworniki pomiarowe były coraz mniejsze i bardziej niezawodne. Umożliwiają to specjalne programy komputerowe służące do projektowania i symulacji takich elementów. Producenci aparatury konduktometrycznej ciągle stawiają również na rozwój swoich produktów pod względem parametrów metrologicznych i użytkowych. Starają się oni wykorzystać do tego najnowsze osiągnięcia nauki dotyczących rozwoju sztucznej inteligencji a także cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wszystkie te działania sprawiają, że urządzenia stają się coraz

tańsze, mniejsze, pobierają mniej energii przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet poprawie swoich właściwości metrologicznych. Dzięki temu konduktometria znajduje coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [1].

2.3. Zastosowania konduktometrii

Ciągły rozwój konduktometrii powoduje, iż jest ona wykorzystywana w coraz to nowych dziedzinach nauki czy przemysłu. W badaniach laboratoryjnych służy ona do wyznaczenia stężenia roztworów, zawierających jony jednego rodzaju lub mieszanin, w których zmienia się stężenie tylko jednego jonu. Natomiast jeśli chodzi o przemysł, to jednym z najpowszechniejszych zastosowań tej dziedziny jest użycie do pomiaru czystości wody. Na podstawie znajomości wartości przewodności można określić z jakiego rodzaju wodą mamy do czynienia oraz czy nadaje się ona do danego procesu przemysłowego. Przykładowe wartości przewodności dla różnego rodzaju wód zostały przedstawione w tabelicy 2.1.

TABLICA 2.1. Wartość przewodności dla różnych rodzajów wód

Rodzaj roztworu	Przewodność
Woda ultra-czysta	0,055–0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Woda czysta (w demineralizatorach)	0,1–1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Woda oczyszczona	1–50 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Woda pitna	0,1–2 mS/cm
Woda powierzchniowa	0,1–8 mS/cm
Woda przemysłowa	1–70 mS/cm
Skoncentrowane kwasy w roztworach alkalicznych	80–2000 mS/cm

Wartości podane za http://www.alitech.com.pl/katalogi/analiza_wody.pdf oraz <http://www.lenntech.pl/dejonizowana-demineralizowana-woda.htm>

Takie zastosowanie jest powszechnie stosowane przede wszystkim w przemyśle chemiczno-farmaceutycznym. Można się domyślić, iż stosowana tutaj woda musi być wysokiej jakości, zatem wykorzystuje się pierwsze trzy rodzaje wód z tabelicy 2.1. Woda oczyszczona jest wykorzystywana do produkcji materiałów nie sterylnych, substancji czyszczących oraz oczyszczania naczyń. Jest to również produkt do wytwarzania wody ultra-czystej. Proces ten polega na wielokrotnej destylacji z użyciem neutralnego szkła lub odpowiednich metali oraz urządzeń, które zapewniają brak kontaktu z otoczeniem. Woda ultra-czysta jest wykorzystywana do przygotowywania produktów medycznych takich jak zastrzyki oraz

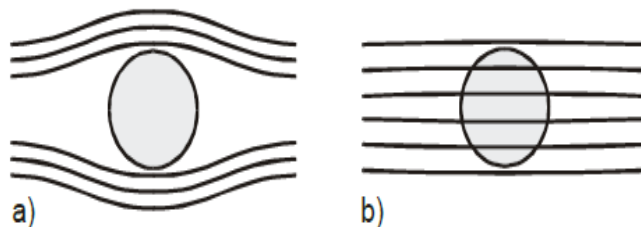
innych produktów medycznych, gdzie ważna jest wysoka czystość. Wodę taką stosuje się również w okulistyce [8].

Inną niezwykle ważną dla naszego życia dziedziną, gdzie znalazła swoje zastosowanie konduktometria, jest medycyna. W tym przypadku stosowana jest ona do określania wartości hematokrytu krwi. Jest to stosunek objętościowy krwinek czerwonych do objętości całej krwi. Wyrażany jest zazwyczaj w procentach. Prawidłowe wskaźniki dla człowieka mieszczą się w granicach 35–60 %, w zależności od płci i wieku.¹ Podczas przeprowadzania takich doświadczeń należy pamiętać o odpowiednim rozcieńczeniu próbki krwi, które powinno wynosić ok 1:100. Pozwala to uniknąć wpływu zmian lepkości, które znacząco wpływają na wyniki pomiarów. Istotne jest również odpowiednie dobranie elektrod oraz częstotliwości wykonywanych pomiarów w celu uniknięcia polaryzacji. Dlatego należy unikać gładkich metalowych elektrod oraz elektrod pokrytych czernią platynową. Eliminację polaryzacji można osiągnąć poprzez stosowanie metod trój-, cztero- lub bezelektrodowych albo wykorzystanie wyższej częstotliwości pomiarowej [1]. Konieczność rozcieńczania próbki sprawia, że objętość krwi potrzebna do przeprowadzenia analizy jest bardzo mała (ok. 0,2 ml). Jest to najtańsza i najprostsza metoda elektrochemiczna do wyznaczania hematokrytu. Poza tym cechuje się wieloma innymi zaletami takimi jak: bardzo dobra liniowość w zakresie 10–70 %, dokładność pomiaru lepsza niż 1 % w zakresie 30–60 % oraz powtarzalność pomiaru ok. 0,5 %. Jest to zatem prosta, szybka i niezawodna metoda stosowana głównie w laboratoriach hematologicznych [1]. Istnieje również inna metoda wyznaczania hematokrytu za pomocą pomiaru przewodności. Jest to jednak metoda pomiaru ciągłego podczas wykonywania hemodializy lub operacji serca. W tym przypadku wykorzystuje się zależność pomiędzy hematokrytem i konduktywnością płynu wewnątrzkomórkowego. Pomiaru te wykonuje się za pomocą czteroelektrodowego czujnika przepływowego, wykorzystując dwie częstotliwości. Najpierw mierzy się z małą częstotliwością, nie przekraczającą 250 kHz. Wówczas krwinki posiadają duży opór omowy i pojemnościowy. Prąd nie płynie przez wnętrze komórek jak przedstawia to rysunek 2.2a. Otrzymujemy wtedy informację o płynie zewnątrzkomórkowym. Natomiast przy pomiarze z dużą częstotliwością rzędu 10–30 MHz opór pojemnościowy krwinki jest porównywalny z oporem otaczającego je płynu zewnątrzkomórkowego i prąd płynie tak jak przedstawia to rysunek 2.2b. Wówczas wykonany pomiar daje informację o sumie konduktywności płynu wewnątrz- i zewnątrzkomórkowego. Obliczając różnicę obu pomiarów uzyskuje się konduktywność płynu wewnątrzkomórkowego. Widać zatem, iż konduktywność krwi jest

¹ <http://pl.wikipedia.org/wiki/Hematokryt>

bardzo ważnym parametrem wykorzystywanym podczas badań serca oraz układu krążenia [1, 9].

Kończąc temat zastosowania konduktometrii w medycynie należy wspomnieć jeszcze



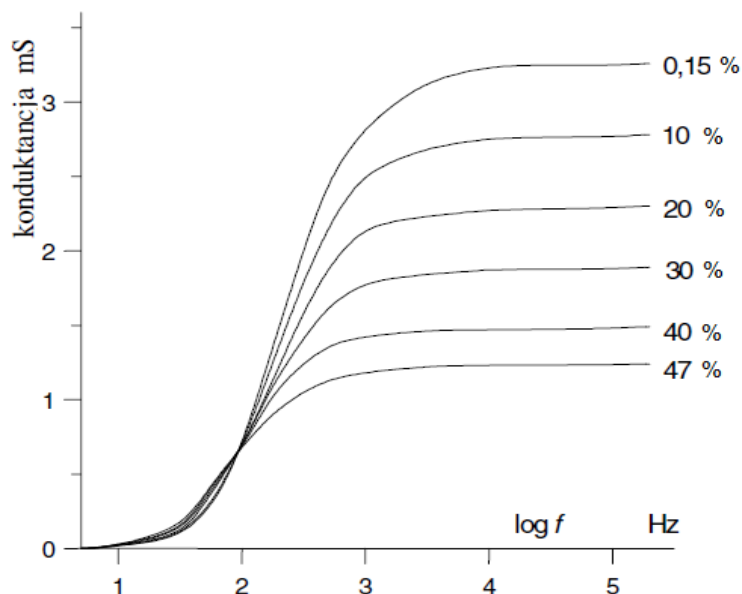
RYSUNEK 2.2. Przepływ prądu przez krwinkę i otaczający ją płyn zewnątrzkomórkowy

opracowane na podstawie [9]

o mikroelektronicznym biosensorze konduktometrycznym, który służy do monitorowania poziomu mocznika w płazmie ludzkiej. Może być również stosowany w chirurgii nerkowej oraz do nadzorowania dializy. Zaletami takiego czujnika są jego niska cena, odporność, prosta obsługa, duża dokładność oraz wysoka czułość na mocznik [1].

Kolejnym przykładem zastosowania konduktometrii jest przemysł spożywczy a w zasadzie mleczarski. W tym przypadku pomiar przewodności stosowany jest podczas szybkich testów mleka. Dzięki temu można określić jego jakość, czyli czy mleko nie jest sfałszowane oraz czy nie pochodzi od chorych zwierząt. Na podstawie pomiarów konduktometrycznych określa się również zawartość tłuszczu i protein w mleku oraz śmietanie. Podczas wykonywania pomiarów należy pamiętać o odpowiednim dobraniu elektrod. Ze względu na łatwość czyszczenia oraz stabilność właściwości powinno się stosować elektrody z gładkiego metalu, stali nierdzewnej lub platyny. Ważna jest również częstotliwość pomiarowa w celu uniknięcia polaryzacji. Dlatego dla elektrod platynowych powinna mieścić się w przedziale 1–100 kHz, natomiast dla elektrod stalowych stosuje się częstotliwość ponad 200 kHz. Na podstawie znajomości konduktancji mleka lub śmietany określa się zawartość tłuszczu występującego w tych produktach. Zaletą takich pomiarów jest duża dokładność w całym zakresie pomiarowym od 0,15 % (odtłuszczone mleko) do 51 % (zagęszczona śmietana). Zależność konduktancji od zawartości tłuszczu bardzo dobrze ilustruje rysunek 2.3 [1].

Innym ciekawym miejscem gdzie wykorzystuje się pomiary przewodności jest przemysł cukrowniczy. Jednym z najważniejszych etapów produkcyjnych cukrowni jest nawapnianie

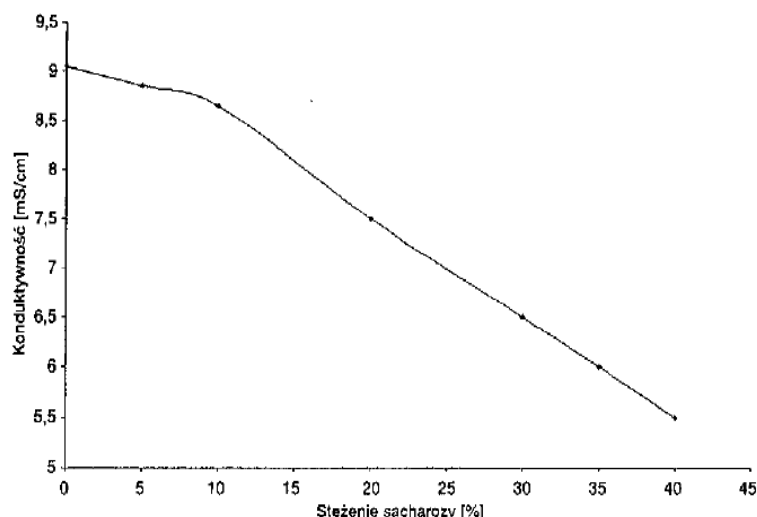


RYSUNEK 2.3. Zależność konduktancji mleka i śmietany w funkcji częstotliwości od zawartości tłuszczu

opracowane na podstawie [1]

soku. Jak w każdym procesie przemysłowym występują zakłócenia. W tym przypadku zakłóceniem jest zmiana stężenia mleka wapiennego, na skutek zmian jego gęstości. W celu prawidłowego przebiegu procesu należy zapewnić aby zmiany gęstości były jak najmniejsze. Do pewnego czasu wielkość tą mierzono metodą wagową. Jednak po przeprowadzeniu odpowiednich badań okazało się, że istnieje liniowa korelacja pomiędzy gęstością i konduktywnością mleka wapiennego. Zatem pomiary konduktywności są wykorzystywane do pośredniego wyznaczania gęstości mleka wapiennego, co znacznie poprawia dokładność pomiaru oraz ułatwia zautomatyzowanie wspomnianego procesu nawapniania [17]. Pomiary konduktometryczne są wykorzystywane w cukrowniach również do określania zawartości sacharozy w roztworach cukrowo-wapiennych. Zmiana stężenia sacharozy powoduje zmianę konduktywności roztworu, co widać dobrze na rysunku 2.4. Zależność ta jest dość liniowa. Wzrost stężenia sacharozy powoduje, iż przewodność roztworu maleje. Powodem tego z pewnością jest wzrost lepkości roztworu wraz ze wzrostem zawartości cukru. W wyniku tego następuje obniżenie ruchliwości jonów i co za tym idzie spadek konduktywności. Poza tym dodatkowo jony wapnia łączą się z cząsteczkami sacharozy w wyniku czego zmniejsza się ilość jonów zdolnych do przenoszenia ładunków elektrycznych [16].

Konduktometry są również nazywane solomierzami. Jest to związane z wykorzystaniem ich do pomiaru zasolenia wody morskiej. Zawartość soli obok temperatury i ciśnienia jest jednym z najważniejszych parametrów opisujących stan fizyczny wody morskiej.



RYSUNEK 2.4. Przebieg zmian przewodności roztworu cukrowo-wapniowego w funkcji stężenia sacharozy

opracowane na podstawie [16]

Zasolenie wody w praktyce wyznacza się ze stosunku przewodności elektrycznej wody do przewodności roztworu wzorcowego KCl. Należy pamiętać o tym, iż czujniki stosowane do takich pomiarów muszą być zdecydowanie bardziej odporne na uszkodzenia mechaniczne niż czujniki laboratoryjne. Jest to spowodowane specyficznymi warunkami w jakich pracują [1].

Przedstawione przykłady zastosowań konduktometrii to tylko kilka z bardzo wielu. Oprócz opisanych powyżej zastosowań, konduktometria wykorzystywana jest również w chromatografii cieczowej, gospodarce wodno-ściekowej, w badaniach gleby i wielu innych dziedzinach nauki czy też przemysłu.

2.4. Metoda znacznikowa

Pomiary konduktometryczne są często wykorzystywane również jako pośrednie pomiary innych wielkości fizycznych. Urządzenia do pomiaru przewodności są jednym z elementów stanowisk służących do wyznaczania natężenia przepływu mediów za pomocą metod znacznikowych. Można wyróżnić trzy różne metody znacznikowe:

- metoda określania czasu przejścia (dwóch punktów),
- metoda rozcieńczenia,
- metoda całkowitej ilości zliczeń.

Konduktometry są stosowane w dwóch pierwszych metodach. W metodzie całkowitej ilości zliczeń konduktometry nie są stosowane, ponieważ znacznikiem w tej metodzie są izotopy pierwiastków promieniotwórczych, a nie jak w pozostałych metodach substancje chemiczne np. chlorek sodu (NaCl) [11]. Dlatego też metoda ta nie zostanie szerzej opisana.

2.4.1. Metoda określania czasu przejścia

Metoda ta jest uznawana za jedną z najprostszych. Polega ona na impulsowym wprowadzaniu znacznika do przepływającego medium oraz pomiarze rozkładu stężeń znacznika w czasie w dwóch oddalonych od siebie punktach pomiarowych. Dysponując rozkładami stężenia znacznika można wyznaczyć czas przejścia pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi t . Natomiast objętościowe natężenie przepływu medium oblicza się z wzoru:

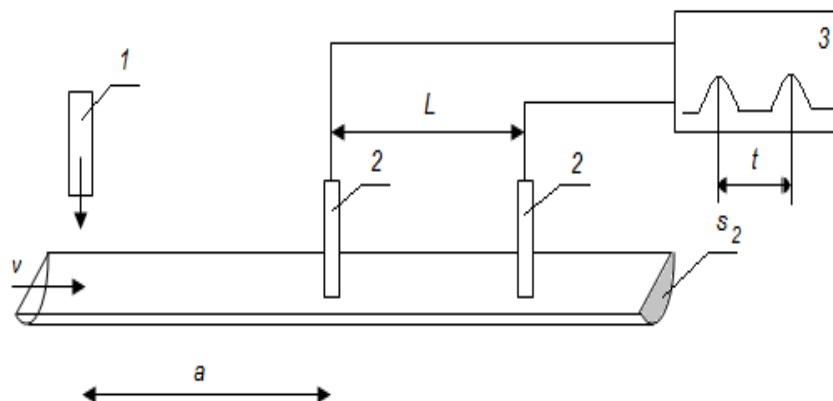
$$v = \frac{L \cdot s_2}{t} = \frac{V}{t}, \quad (5)$$

gdzie: L – odległość punktów pomiarowych, s_2 – pole przekroju rurociągu, V – objętość cieczy znajdującej się pomiędzy płaszczyznami punktów pomiarowych.

Pomiar natężenia przepływu medium metodą dwóch punktów dobrze ilustruje rysunek 2.5. Aby uzyskać miarodajne wyniki pomiaru stosując metodę dwóch punktów należy pamiętać o tym, aby pierwszy punkt pomiarowy umieszczony był w dostatecznej odległości od miejsca dozowania znacznika. Zapewnia to dostateczne wymieszanie znacznika z transportującym go medium. Odległość punktów pomiarowych też powinna być dość długa w celu minimalizacji błędu pomiaru czasu. Oprócz tego ważne jest dokładne określenie poprzecznego przekroju rurociągu oraz jego całkowite zapełnienie przepływającym medium [11].

2.4.2. Metoda rozcieńczenia

Metoda ta polega na ciągłym podawaniu znacznika do przepływającego medium. Norma PN-EN 24006 definiuje ją następująco: „metoda pomiaru strumienia płynu, w której znacznik o znanym stężeniu jest wtryskiwany stałym i znanym strumieniem do jednego przekroju poprzecznego przewodu, a jego rozcieńczanie jest mierzone w drugim przekroju poprzecznym położonym po stronie odpływowej, gdzie występuje ściśle określony stopień wymieszania” [10]. Natężenie przepływu medium v_2 określa się na podstawie znajomości stężenia znacznika C_1 wprowadzanego ze stałym i znanym natężeniem przepływu v_1 . Następnie w pewnej odległości od punktu wprowadzania znacznika pobiera się próbkę płynu



RYSUNEK 2.5. Schemat pomiaru natężenia przepływu medium metodą dwóch punktów

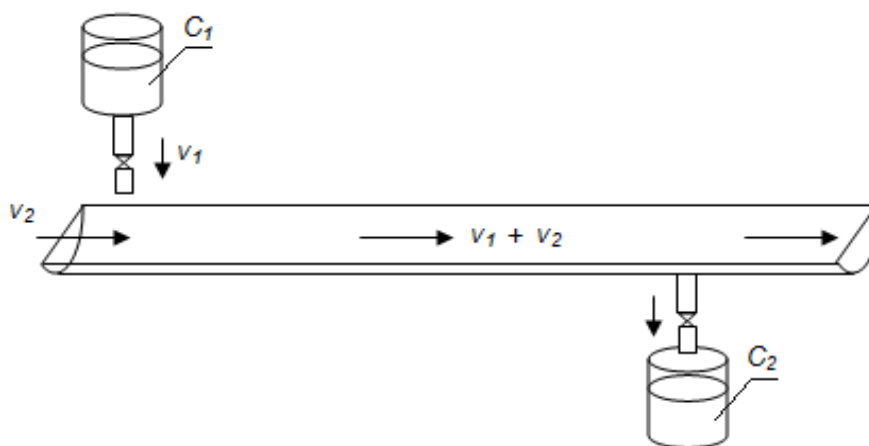
1 – dozowanie znacznika, 2 – detektory, 3 – rozkłady stężenia znacznika, a – odcinek zapewniający całkowite wymieszanie się znacznika z transportowanym medium, opracowane na podstawie [11]

i określa stężenie zawartego w niej znacznika C_2 . Odległość poboru próbki powinna być taka aby nastąpiło całkowite wymieszanie znacznika z transportującym go medium [11]. Przebieg pomiaru dla metody rozcieńczenia dobrze ilustruje rysunek 2.6. Korzystając z prawa zachowania masy znacznika można zapisać równanie:

$$v_2 C_1 = (v_2 + v_1) C_2. \quad (6)$$

Przyjmując $v_2 \gg v_1$ można zapisać:

$$v_2 = v_1 \frac{C_1}{C_2}. \quad (7)$$



RYSUNEK 2.6. Schemat pomiaru natężenia przepływu medium metodą rozcieńczenia

opracowane na podstawie [11]

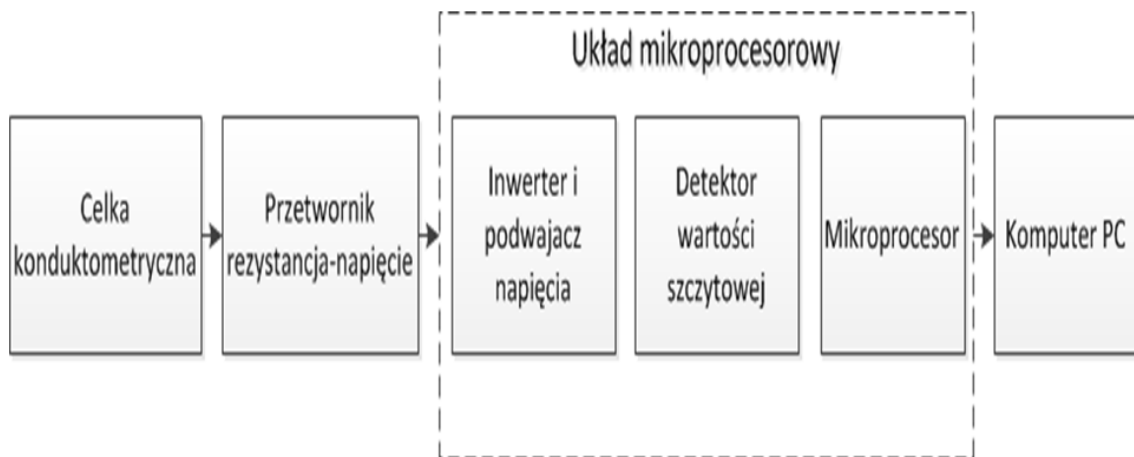
Jak wynika z wzoru (7) objętościowe natężenie przepływającego medium nie zależy od przekroju poprzecznego rurociągu, co jest niewątpliwie zaletą tej metody. Dzięki temu

można z dużą dokładnością mierzyć natężenie przepływu cieczy w rurociągach lub kanałach o nieznanych wymiarach. Należy pamiętać jednak aby znacznik wprowadzany był zawsze równomiernie do rurociągu oraz dostatecznie wymieszał się z przepływającym medium [11].

Rozdział 3

Cześć elektroniczna

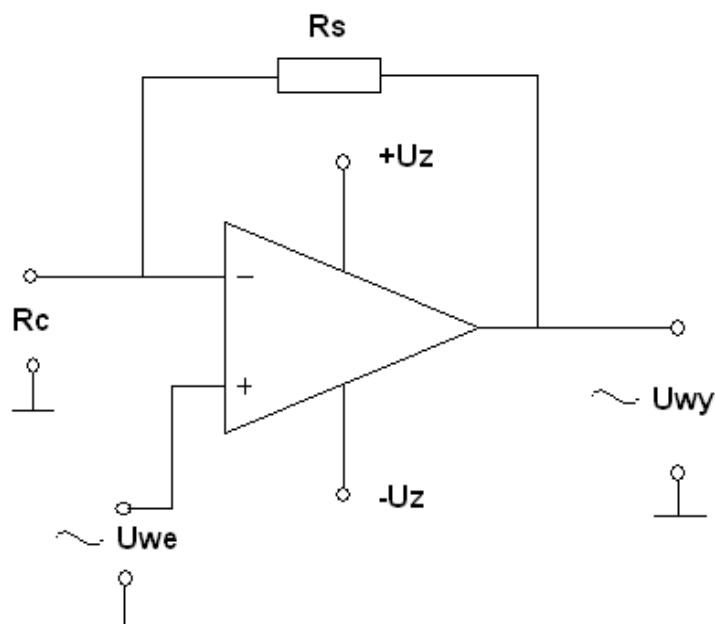
Cześć ta składa się z kilku mniejszych podzespołów. Ogólny schemat blokowy układu konduktometru przedstawia rysunek 3.1.



RYSUNEK 3.1. Ogólny schemat blokowy konduktometru do pomiarów dynamicznych

3.1. Przetwornik rezystancja-napięcie

Przetwornik ten został wykonany w ramach projektu z przedmiotu Inteligentne Przetworniki Pomiarowe. Jest to układ elektroniczny, którego zadaniem jest przetwarzanie rezystancji jako sygnału wejściowego na sygnał wyjściowy w postaci napięcia. Przetwornik ten został oparty na układzie nieodwracającym wzmacniacza operacyjnego. Początkowo został zastosowany jeden z najprostszych i najbardziej popularnych wzmacniaczy operacyjnych $\mu A741$. Schemat ideowy przedstawia rysunek 3.2.



RYSUNEK 3.2. Schemat układu przetwornika rezystancja-napięcie

R_c – rezystancja celki pomiarowej, R_s – rezystancja sprzężenia zwrotnego, $\pm U_z$ – napięcie zasilania, $\sim U_{we}$ – zmienne napięcie wejściowe międzyszczytowe, $\sim U_{wy}$ – zmienne napięcie wyjściowe międzyszczytowe

Wzmocnienie wzmacniacza pracującego w takiej konfiguracji można obliczyć z wzoru:

$$A = 1 + \frac{R_s}{R_c}, \quad (8)$$

lub na podstawie napięć:

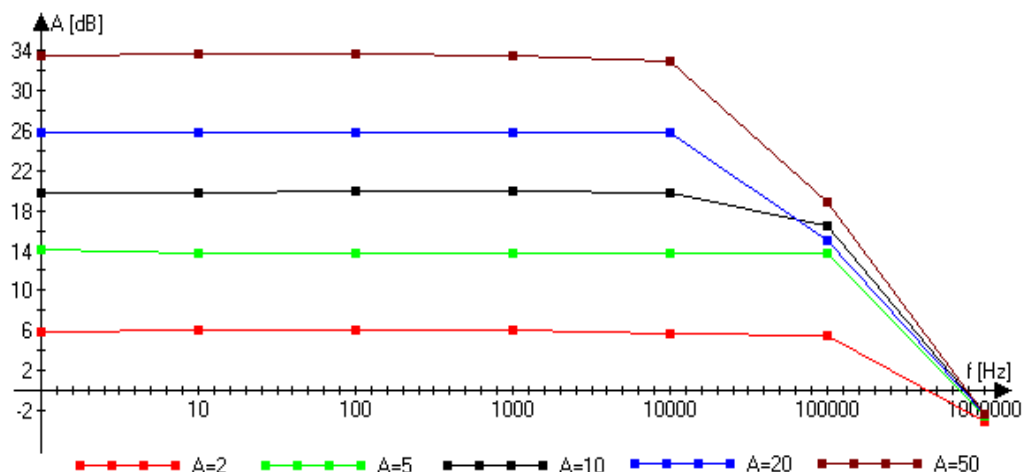
$$A = \frac{U_{wy}}{U_{we}}. \quad (9)$$

Z wzorów (8) oraz (9) wynika, iż wartość napięcia wyjściowego jest równa:

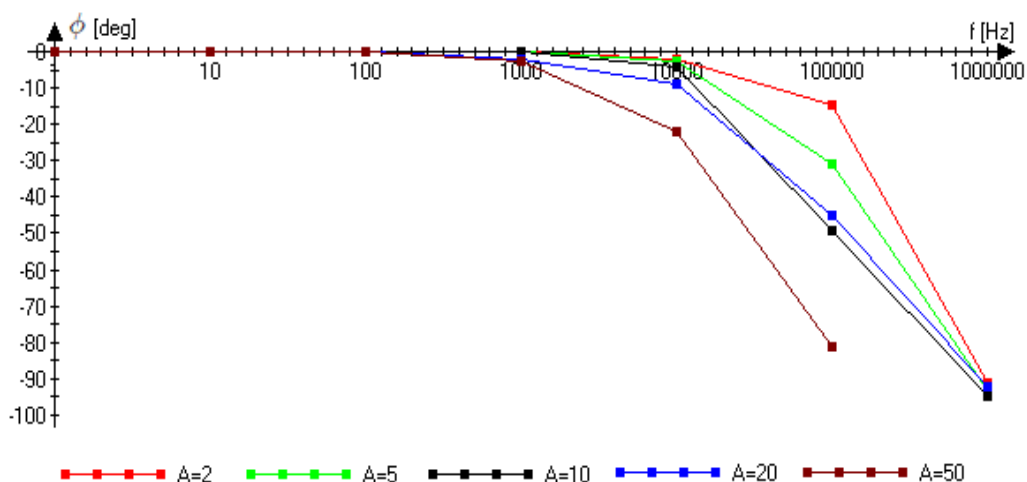
$$U_{wy} = \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) U_{we}. \quad (10)$$

Do wejścia nieodwracającego podłącza się celkę pomiarową, która zmienia swoją rezystancję na skutek zmian stężenia mierzonego roztworu. Ponieważ do pomiarów konduktometrycznych stosuje się zmienne pole elektryczne, do wejścia nieodwracającego podłącza się napięcie przemienne o przebiegu sinusoidalnym. Omawiany przetwornik jest częścią konduktometru do pomiarów dynamicznych. W związku z tym, że najważniejszą cechą całego konduktometru powinna być szybkość działania, częstotliwość napięcia wejściowego nie powinna być niższa niż 1000 Hz. Zatem w celu określenia przydatności wzmacniacza $\mu A741$ został wykonany prototyp układu przetwornika na płycie uniwersalnej. Następnie został on przebadany pod kątem szerokości pasma przenoszenia dla różnych wzmocnień. Zmiana wzmocnienia była realizowana poprzez zmianę rezystancji sprzężenia zwrotnego

Rs, natomiast w miejsce celki pomiarowej podpięto rezystor. Badania przeprowadzono w zakresie częstotliwości 0,1 Hz – 1 MHz. Rysunki 3.3 oraz 3.4 przedstawiają charakterystykę bodego wzmacniacza $\mu A741$. Pełne wyniki pomiarów znajdują się w załączniku A w odpowiedniej tabeli [12]. Wiadomo jednak, że celka to nie tylko rezystancja. Dochodzą



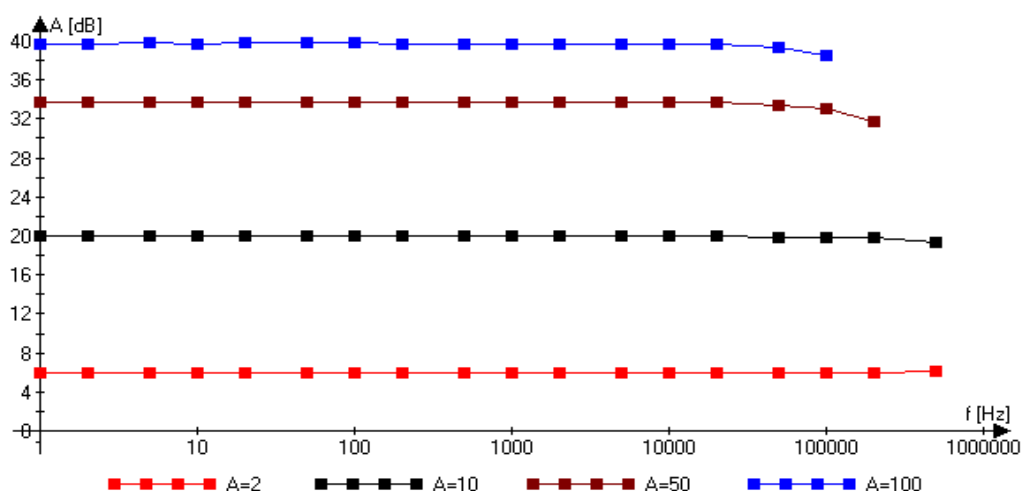
RYSUNEK 3.3. Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza $\mu A741$



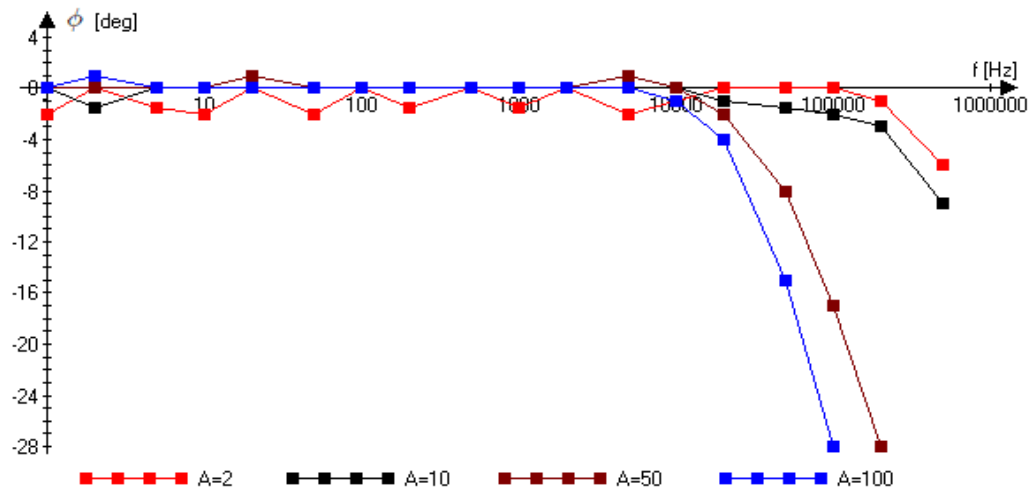
RYSUNEK 3.4. Charakterystyka fazowa wzmacniacza $\mu A741$

również pojemności celki. Ich wpływ jest uzależniony od częstotliwości napięcia wejściowego. Aby maksymalnie wyeliminować niekorzystny wpływ pojemności celki na wynik pomiaru oraz dobrać odpowiednią częstotliwość napięcia wejściowego zostały wykonane pomiary rzeczywistymi celkami. Wykorzystano dwie celki CD-21 o stałej $k = 1,05$ oraz EPS 2ZM o stałej $k = 1,55$. Badania przeprowadzono dla roztworu o maksymalnym stężeniu, który będzie wstrzykiwany do kanału pomiarowego oraz dla wody kranowej, dla której

wzmocnienie układu powinno być najmniejsze. Pełne wyniki pomiarów znajdują się w załączniku A. Na ich podstawie stwierdzono, że częstotliwość napięcia wejściowego powinna się mieścić w zakresie 1-10 kHz, w zależności od wykorzystanej celki pomiarowej. Dla celki CD-21 będzie to częstotliwość ok. 1 kHz, natomiast dla celki EPS 2ZM ok. 10 kHz. Jest to zgodne z teoretycznymi częstotliwościami zalecanymi do pomiarów konduktometrycznych w zależności od stałej celki i od stężenia roztworów. W przypadku celek o stałych ok. 1 częstotliwość sygnału wejściowego powinna wynosić 1 kHz, natomiast dla celek o stałej powyżej 1 – 10 kHz. Dla obu celek wzmocnienie maksymalne jakie uzyskaliśmy to ok. 100 – w przypadku roztworu o maksymalnym stężeniu, natomiast minimalne wzmocnienie to ok. 2 – dla wody kranowej. Ostatecznie stężenie w kanale będzie mniejsze niż to, które posiada przebadany roztwór. A co za tym idzie wzmocnienie układu będzie mniejsze niż 100. Mimo to przebadany wzmacniacz operacyjny $\mu A741$ nie spełnia postawionych wymagań, gdyż dla wzmocnienia ok. 50 i częstotliwości 1 kHz wprowadza przesunięcie fazowe $-2,5^\circ$. Zaś dla 10 kHz, przy takim samym wzmocnieniu jak poprzednio, przesunięcie fazowe wynosi już 20° . Niezależnie od tego jaka celka będzie używana, należało znaleźć wzmacniacz o szerszym paśmie roboczym. Po przeanalizowaniu parametrów wielu wzmacniaczy operacyjnych szerokopasmowych zostały wytypowane dwa: LF357 o paśmie 20 MHz oraz AD817 o paśmie 50 MHz. Następnie zostały wykonane prototypy przetworników oparte o wspomniane wzmacniacze w celu sprawdzenia ich rzeczywistego działania. Ostatecznie lepszy okazał się wzmacniacz AD817, który ma identyczny układ wyprowadzeń jak $\mu A741$. Rysunki 3.5 oraz 3.6 przedstawiają charakterystykę bodego wzmacniacza AD817. Pełne dane pomiarowe znajdują się w załączniku A [12].

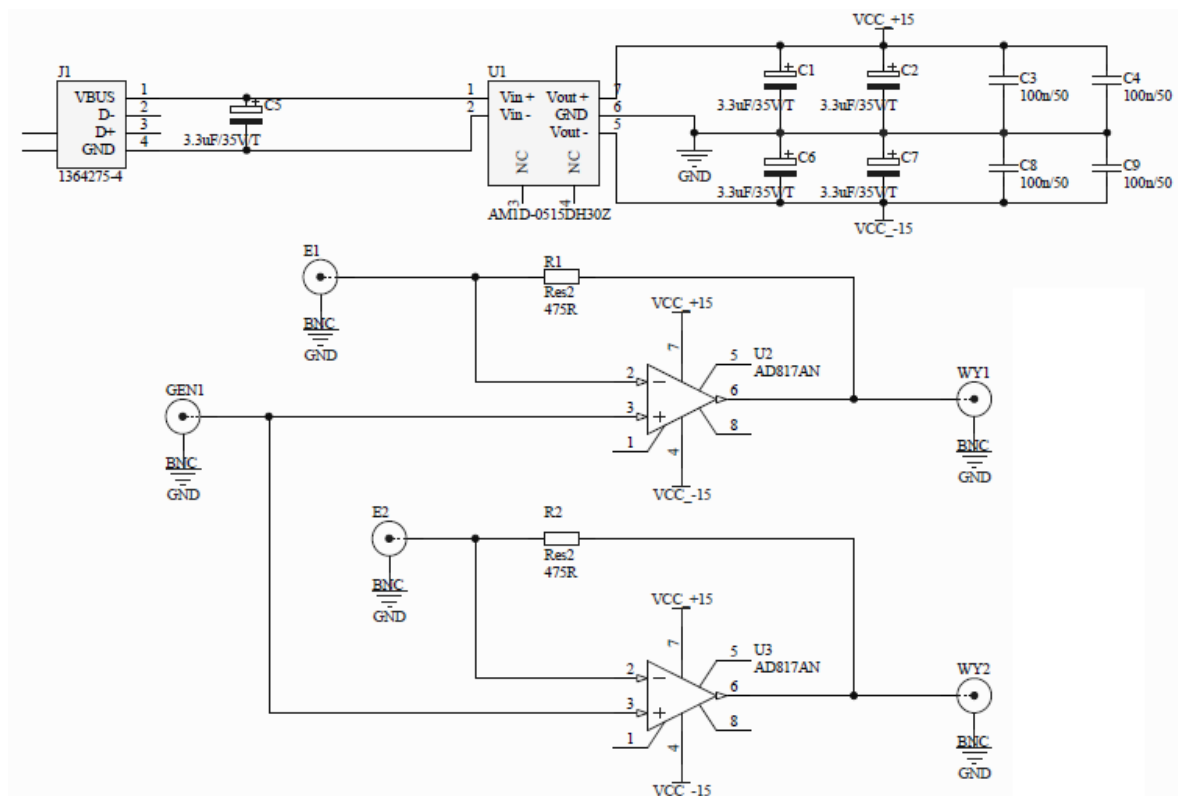


RYSUNEK 3.5. Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza AD817



RYSUNEK 3.6. Charakterystyka fazowa wzmacniacza AD817

Widać, że zastosowany wzmacniacz jest dużo lepszy niż $\mu A741$. Nawet dla dużych wzmocnień przenosi sygnał bez strat, a przesunięcie fazowe pojawia się dopiero przy dużych wzmocnieniach i częstotliwości powyżej 10 kHz. Minimalne przesunięcia fazowe dla sygnału o mniejszej częstotliwości wynikają z niedokładności aparatury pomiarowej.

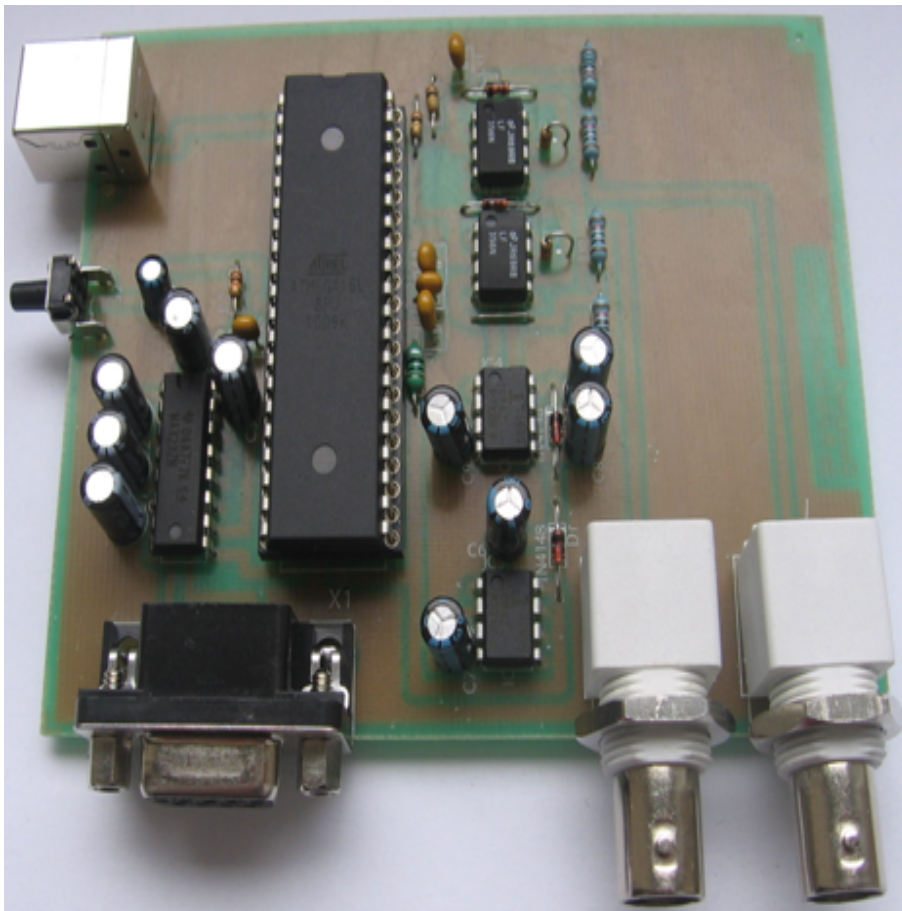


RYSUNEK 3.7. Schemat elektryczny przetwornika rezystancja-napięcie w oparciu o układ scalony AD817

Płytką przetwornika dla dwóch elektrod pomiarowych została wykonana przez Pana mgr inż. Wojciecha Błotnickiego. Końcowy schemat elektryczny przedstawia rysunek 3.7.

3.2. Układ mikroprocesorowy

Układ mikroprocesorowy składa się z wielu podzespołów elektronicznych, które zostaną opisane osobno. Widok zmontowanego układu przedstawia rysunek 3.8.



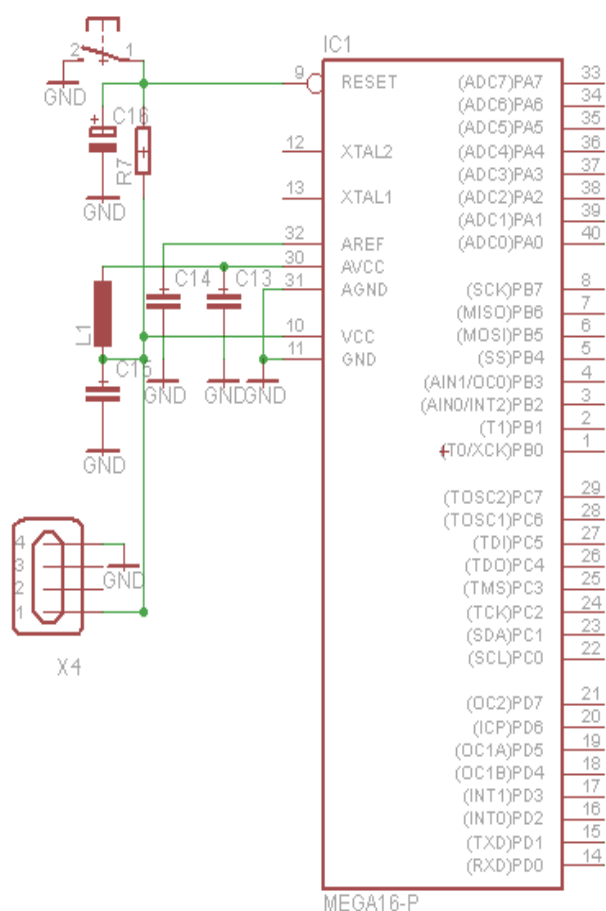
RYSUNEK 3.8. Widok gotowego układu mikroprocesorowego

3.2.1. Mikrokontroler i przetwornik ADC

Mikrokontroler jest to najważniejsza część całego układu. Można nawet powiedzieć, że jest to jego serce. W przypadku tego projektu służy on do sterowania procesem pomiaru napięcia, konwersji tego napięcia na postać cyfrową oraz przesyłania danych do komputera.

Został on oparty na mikrokontrolerze ATmega16L ze względu na prostotę programowania oraz brak konieczności stosowania zewnętrznego przetwornika analogowo-cyfrowego. Układ ten może być zasilany napięciem z zakresu 2,7–5,5 V. W tym przypadku układ zasilany jest napięciem 5 V z poru USB komputera, które podawane jest na pin VCC. Dodatkowo pomiędzy masę a pin VCC podpięty został kondensator filtrujący. Układ może pracować w zakresie częstotliwości 0–8 MHz. Tutaj została ona skonfigurowana na 8 MHz, poprzez odpowiednie ustawienie fusebitów. Pozostałe parametry układu ATmega16L można znaleźć w pozycji [13].

Mikrokontroler ATmega16L wyposażony jest w 10-bitowy przetwornik ADC z sukce-



RYSUNEK 3.9. Schemat zasilanie układu ATmegi i ADC oraz podłączenie przycisku RESET

sywną aproksymacją. ADC podłączony jest do 8 kanałowego multiplexera pozwalając na przyłączenie ośmiu napięć wejściowych do każdego z pinów portu A. Do celów projektu wykorzystywane są tylko dwa wejścia przetwornika (PA0 i PA1), ponieważ wykorzystujemy tylko dwie celki pomiarowe. Na każde z nich podawane jest napięcie wyjściowe z detektora wartości szczytowej. Do zasilania przetwornika jest specjalnie wyprowadzony pin

AVCC. Napięcie zasilające ADC nie może się różnić więcej niż o $\pm 0,3$ V od VCC. Zatem przetwornik również zasilany jest napięciem 5 V z portu USB. Dodatkowo dla lepszego zabezpieczenia przed szumami z zewnątrz, jest on zasilany poprzez filtr dolnoprzepustowy LC.

Jeśli chodzi o napięcie referencyjne to struktura układu daje do wyboru trzy możliwości: wewnętrzne zintegrowane źródło napięcia referencyjnego o wartości 2,56 V, napięcie AVCC albo zewnętrzne napięcie referencyjne podłączone do pinu VREF. W przypadku tego układu zastosowana została pierwsza z wymienionych opcji. Dodatkowo pomiędzy pin AREF i masę został podłączony kondensator odsprężający, który poprawia odporność na zakłócenia.

W układzie został zastosowany przycisk RESET, który służy do startu działającego programu od początku, na wypadek jakichkolwiek błędów podczas normalnej pracy programu.

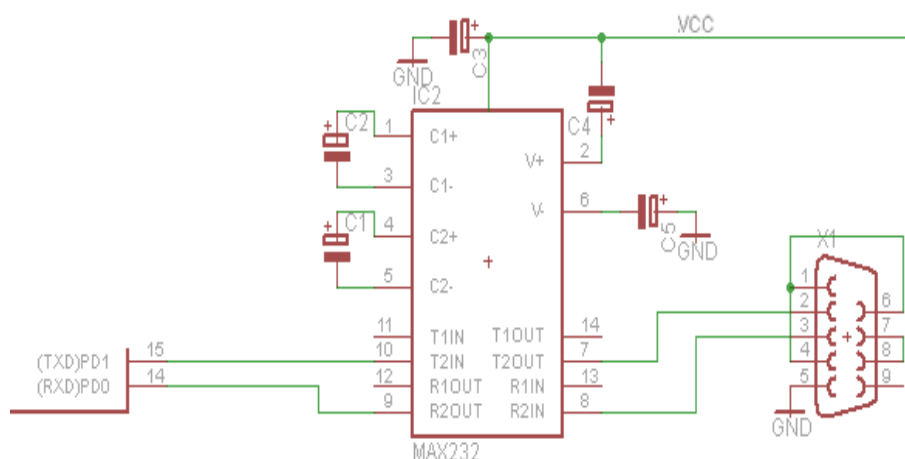
3.2.2. Układ komunikacji z komputerem

Do komunikacji mikrokontrolera z komputerem została wykorzystany interfejs RS232. Jest to możliwe dzięki obecności w mikrokontrolerze modułu USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter), przeznaczonego m.in. właśnie do tego celu. W tym przypadku została wykorzystana transmisja jednokierunkowa (simplex) o konfiguracji zerowej (null modem), gdyż oba połączone ze sobą urządzenia są typu DTE (Data Terminal Equipment) ¹. Dane z ATmegi są przesyłane do komputera, natomiast komputer nie wysyła nic do mikrokontrolera. Został wykorzystany najprostszyszy sposób połączenia dwóch urządzeń za pomocą podzbioru trzech linii opisanych przez standard RS232C jako:

- TxD (Transmitted Data) – dane nadawane,
- RxD (Received Data) – dane odbierane,
- SG (Signal Ground) – masa sygnałowa.

Dodatkowo niezbędny jest układ MAX232, który dopasowuje standard transmisji mikrokontrolera RS do standardu RS232 komputera. Układ ten może być zasilany napięciem od 0 do 5 V, a na wyjściu można uzyskać napięcie od -15 do 15 V. Układ połączeń przedstawia rysunek 3.10.

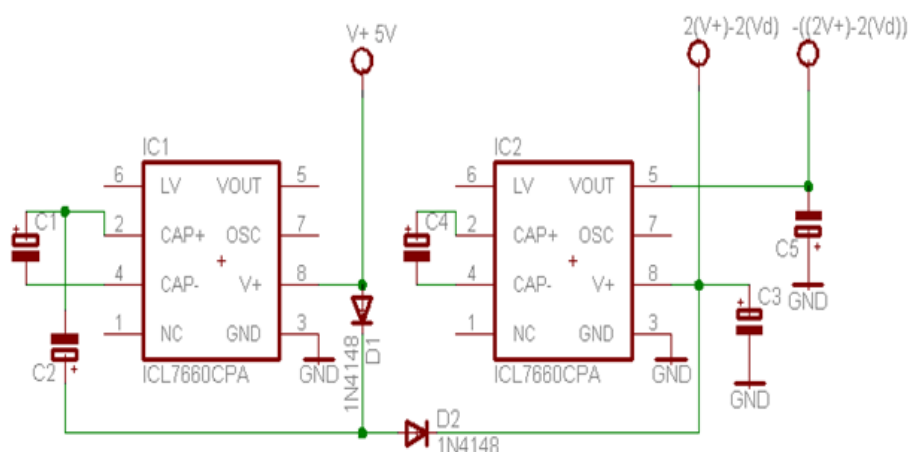
¹ <http://www.fizyka.umk.pl/~ptarg/labview/fole/RS232.pdf> z dnia 12.04.2011



RYSUNEK 3.10. Schemat układu komunikacji z komputerem

3.2.3. Konwerter i podwajacz napięcia

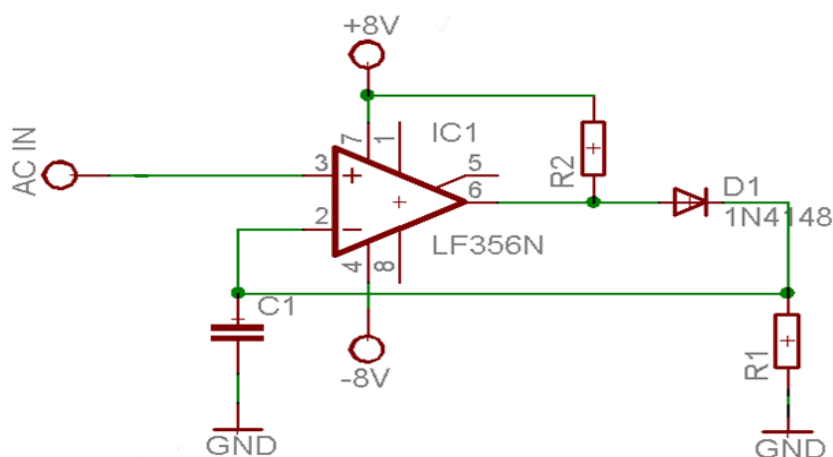
Układ ATmegi oraz przetwornika zasilane są napięciem stałym 5 V. Natomiast do zasilania układu detektora wartości szczytowej potrzebne jest napięcie o wyższej wartości. Na dodatek potrzebne jest napięcie symetryczne. Dlatego też został zastosowany układ opisywany w tym podrozdziale. Oparty jest on o dwa układy scalone ICL7660CPAZ. Pierwszy z nich służy do podwyższania napięcia z 5 V do wartości dwukrotnie większej pomniejszonej o sumę spadków napięć na diodach, czyli około 8 V. Tak podwyższone napięcie jest podawane na drugi układ, który zmienia polaryzację napięcia i daje wartość ok. -8 V. Schemat elektryczny przedstawia rysunek 3.11. Napięcia te w pełni wystarczają do poprawnej pracy układu detekcji amplitudy.



RYSUNEK 3.11. Schemat układu służącego do podwyższania i zmiany polaryzacji napięcia

3.2.4. Detektor wartości szczytowej

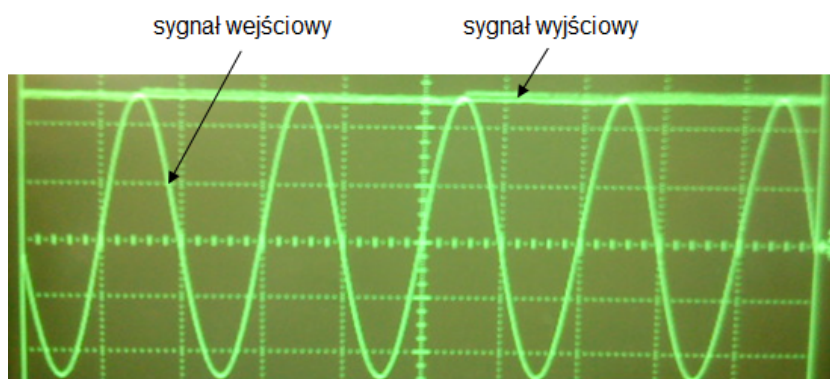
Bardzo ważnym elementem całego projektu jest detektor wartości szczytowej. Został on zastosowany w układzie mikroprocesorowym w celu zamiany napięcia o przebiegu sinusoidalnym pochodzącym z przetwornika rezystancja-napięcie. Częstotliwość tego sygnału wynosi 10 kHz. Aby możliwe było przetworzenie takiego napięcia na postać cyfrową konieczne byłoby zastosowanie szybkiego przetwornika a/c. Według twierdzenia Kotielnikowa – Shannona (zwane również twierdzeniem Nyquista), aby sygnał ciągły mógł być ponownie wiernie odtworzony z sygnału dyskretnego, musi być próbkowany z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od granicznej częstotliwości swego widma. W praktyce jednak stosuje się częstotliwość próbkowania zdecydowanie większą niż podwojona częstotliwość sygnału próbkowanego, co najmniej częstotliwość 10 razy większą. W takim przypadku konieczne byłoby zastosowanie przetwornika innego niż wbudowany w mikrokontroler ATmega16L. Dlatego też został zastosowany układ detektora wartości szczytowej, ponieważ ważna jest tylko obwiednia badanego sygnału. A konkretniej dodatnia wartość amplitudy z racji tego, że sygnał jest symetryczny.



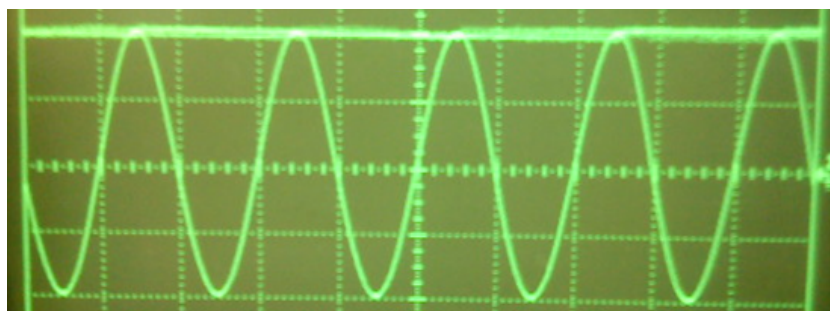
RYSUNEK 3.12. Schemat elektryczny detektora wartości szczytowej

Układ działa na zasadzie ładowania kondensatora przez diodę, która odcina ujemną połowę sinusoidy. Jeżeli napięcie wejściowe jest mniejsze niż napięcie na kondensatorze C1 to dioda D1 nie przewodzi. Natomiast gdy jest odwrotnie to dioda przewodzi i na skutek ujemnego sprzężenia zwrotnego napięcie na kondensatorze jest równe napięciu wejściowemu. Dzięki temu kondensator ładuje się do wartości szczytowej napięcia wejściowego. Na wyjściu otrzymujemy wartość stałą napięcia równoważną z wartością amplitudy

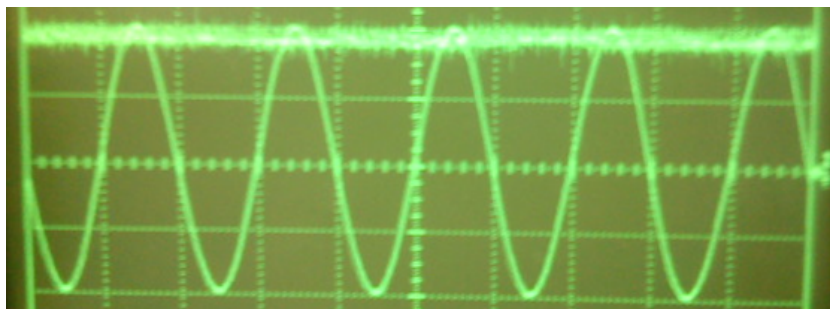
sygnału wejściowego. Rezystor R1 służy do rozładowania napięcia wyjściowego. Czas rozładowania zależy od wartości elementów R1 i C1, od których zależy wartość stałej czasowej ($\tau = R1C1$). W tym układzie mają one wartość $R1 = 100 \text{ k}\Omega$ a $C1 = 100 \text{ nF}$. Wzmacniacz operacyjny stosuje się dla wyeliminowania wpływu napięcia przewodzenia. Detektor został zbudowany w oparciu o scalony układ wzmacniacza operacyjnego LF356N. Ważną cechą tego modelu jest szerokie pasmo przenoszenia. Ze względu na dość dużą częstotliwość badanego sygnału nie każdy układ wzmacniacza działałby poprawnie w tym detektorze. Wzmacniacze o węższym paśmie przenoszenia obcinają wartość sygnału na wyjściu. Dla częstotliwości sygnału do 1 kHz praktycznie każdy wzmacniacz nadaje się do tego układu, natomiast dla wyższych częstotliwości wybór jest bardziej ograniczony. Układ jest zasilany napięciem symetrycznym ok. $\pm 8 \text{ V}$ z układu, który zamienia biegunowość oraz podwyższa wartość napięcia [14]. W układzie mikroprocesorowym zostały wykorzystane dwa takie detektory w celu możliwości pomiaru za pomocą dwóch celek konduktometrycznych. Schemat pojedynczego detektora przedstawia rysunek 3.12. Natomiast rysunki 3.13, 3.14 oraz 3.15 pokazują działanie detektora.



RYSUNEK 3.13. Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 5 \text{ V}$



RYSUNEK 3.14. Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 2 \text{ V}$



RYSUNEK 3.15. Działanie detektora wartości szczytowej dla $u_{wep-p} = 400 \text{ mV}$

Rozdział 4

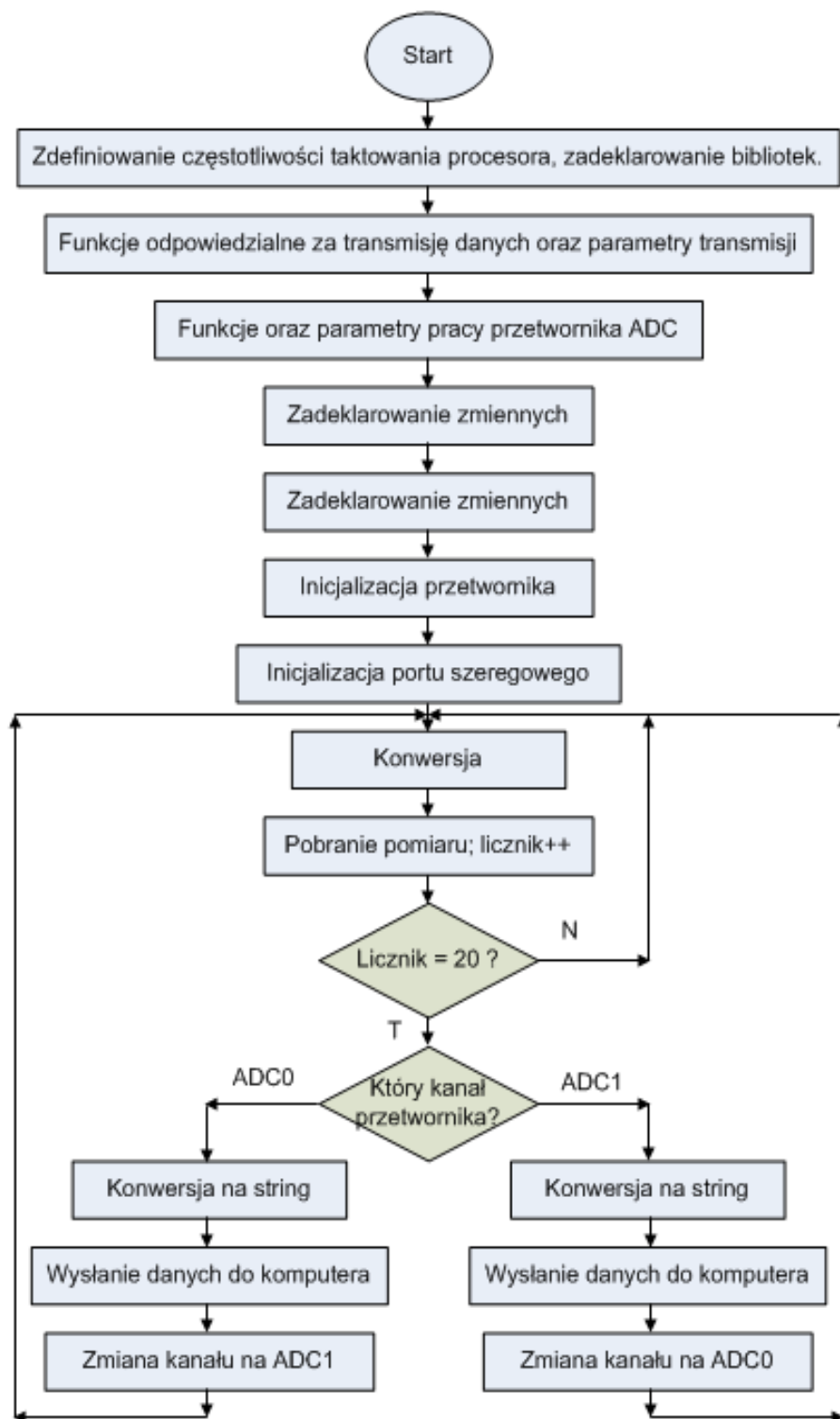
Oprogramowanie

4.1. Układ mikroprocesorowy

Program obsługujący układ mikroprocesorowy został napisany w darmowym oprogramowaniu AVRStudio 4. Podczas realizacji projektu układ mikrokontrolera ATmega16L programowany był na zwykłej płytce stykowej za pomocą programatora STK500v2 USB, który wykorzystuje standard USB do komunikacji pomiędzy komputerem a mikroprocesorem. Posiada on również możliwość bezpośredniego programowania procesorów z bezpłatnego oprogramowania firmy Atmel – AVRStudio. Układ docelowy łączy się przez standardowe złącze (2x5 pinów) dla programatorów ISP – standard KANDA.

Strukturę oraz sposób działania programu przedstawia najlepiej schemat z rysunku 4.1. Na początku konieczne jest zadeklarowanie bibliotek niezbędnych do korzystania z potrzebnych funkcji. Trzeba również określić częstotliwość pracy układu ATmegi. Domyślnie są one ustawiane na wartość 1 MHz. Tutaj zostało to zmienione na 8 MHz. Kolejnym krokiem programu jest zadeklarowanie i zdefiniowanie wszystkich funkcji odpowiedzialnych za transmisję danych w postaci cyfrowej z układu mikrokontrolera do komputera. Aby transmisja przebiegała prawidłowo konieczne jest również odpowiednie ustawienie parametrów transmisji, z których najważniejszym jest prędkość transmisji. Należy pamiętać o tym, iż nie może być ona zbyt mała ponieważ układ może nie nadążyć z wysyłaniem danych pomiarowych. Nie może być ona również zbyt wysoka, gdyż dane będą przekłamane. Prędkość transmisji należy wybrać odpowiednio do zastosowanej częstotliwości taktowania procesora, tak aby błąd transmisji danych nie przekraczał 2%. Parametry transmisji dla układu mikroprocesorowego konduktometru:

- prędkość transmisji (baud rate) – 38400,
- liczba bitów danych (data bits) – 8,
- liczba bitów parzystości (parity) – brak,
- liczba bitów stopu (stop bits) – 1.



RYSUNEK 4.1. Schemat blokowy przedstawiający działanie programu mikroprocesora

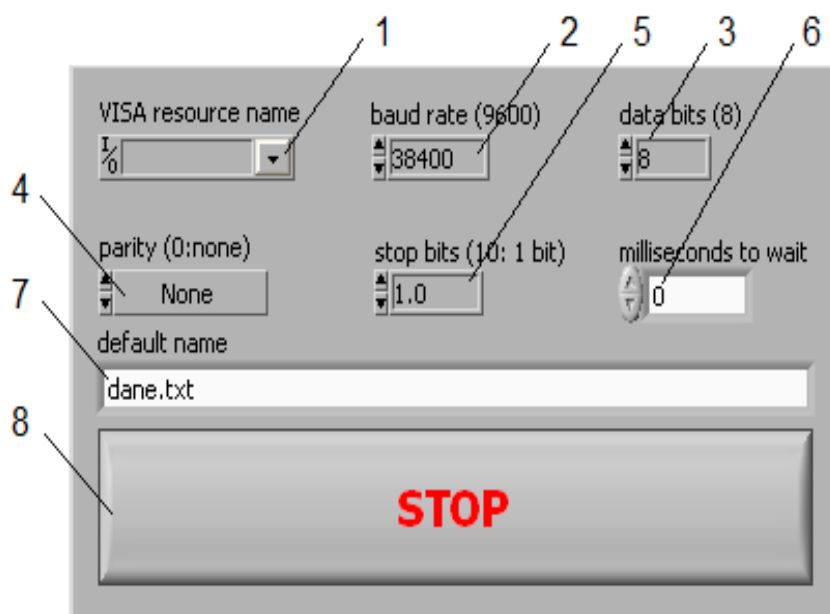
Kolejnym ważnym elementem programu jest część odpowiedzialna za prawidłowe działanie przetwornika analogowo–cyfrowego wbudowanego w układ ATmegi. Tutaj także należy odpowiednio zadeklarować funkcje obsługujące przetwornika oraz parametry jego

pracy. Obdyma się to poprzez odpowiednie ustawienie portów mikrokontrolera. Pierwszym istotnym parametrem pracy przetwornika ADC jest napięcie referencyjne. Spośród trzech możliwości wyboru została zastosowana opcja wewnętrznego napięcia referencyjnego o wartości 2,56 V. Drugą istotną rzeczą jest odpowiednie ustawienie częstotliwości taktowania przetwornika, gdyż musi on być taktowany własnym zegarem. Aby możliwe było wykorzystanie pełnej rozdzielczości przetwornika częstotliwość ta powinna się mieścić w zakresie 50–200 kHz. Ustawienie tej częstotliwości można dokonać za pomocą wbudowanego modułu preskalera, który w zależności od ustawienia odpowiednich portów dzieli częstotliwość zegara CPU. Teraz można przejść do pętli głównej programu odpowiedzialnej bezpośrednio za działanie układu mikroprocesorowego. Na początku oczywiście konieczne jest zadeklarowanie wszystkich zmiennych używanych w programie. Następnie program inicjalizuje port szeregowy AVRa oraz przetwornik ADC. Przetwornik analogowo–cyfrowy może wykonywać pomiary w dwóch trybach: pojedynczego pomiaru oraz tryb pomiaru ciągłego. W układzie konduktometru wykorzystano pierwszy tryb. Ciągłe pomiar zapewnia nieskończona pętla while. Przetwornik taktowany jest częstotliwością 62,5 kHz. Pojedyncza konwersja trwa 13 cykli. Zatem wykonuje on ponad 4500 pomiarów na sekundę. Układ mikroprocesorowy konduktometru powinien działać z częstotliwością ok. 100 Hz dla pojedynczego kanału. W związku z tym co 40 pomiar dla pojedynczego kanału jest przesyłany do komputera. Wynika to z faktu, iż pozostałe instrukcje odpowiedzialne za przetworzenie oraz wysłanie danych zajmują jakiś określony czas. Surowy pomiar z przetwornika jest 10-bitową liczbą. Natomiast maksymalna liczba danych, które można przesłać do komputera za pomocą standardu RS232 wynosi 8. Rozwiązano to poprzez zamianę liczby 10-bitowej na string, a następnie wysłanie go znak po znaku do komputera, który odczytuje przesyłane dane w postaci znaków ASCII.

4.2. Odczyt i magazynowanie danych

Dane pochodzące z układu mikroprocesorowego są przesyłane do komputera za pomocą standardu RS232. Aby mieć możliwość ich dalszej obróbki należy je zmagazynować. Do tego celu została zbudowana prosta aplikacja w LabVIEW, służąca do odczytu danych pomiarowych z portu RS232 komputera oraz do zapisu tych danych do pliku. Są to pliki z rozszerzeniem txt. Dane zapisane w plikach tekstowych są wygodne do dalszej obróbki. Często można je od razu lub po niewielkiej modyfikacji eksportować do różnych

programów, umożliwiających głębszą analizę oraz wizualizację zgromadzonych danych. Rysunek 4.2 przedstawia panel czołowy wspomnianego programu. Jest to prosty interfejs, w którym użytkownik podaje wszystkie parametry konieczne prawidłowej transmisji oraz nazwę pliku, do którego te dane będą zapisywane. Miejsce na dysku, gdzie plik z danymi pomiarowymi będzie zapisywany, wybierany jest przy każdym uruchomieniu programu. Schemat blokowy omawianego programu przedstawia rysunek C z załącznika C.



RYSUNEK 4.2. Widok panelu czołowego programu służącego do zapisu danych do pliku

1 – wybór portu szeregowego komputera, 2 – prędkość transmisji danych, 3 – liczba bitów danych, 4 – liczba bitów parzystości, 5 – liczba bitów stopu, 6 – czas opóźnienia działania pętli, 7 – nazwa docelowego pliku z danymi, 8 – przycisk zatrzymujący działanie programu

Rozdział 5

Działanie konduktometru

5.1. Wyznaczenie czasu odpowiedzi (czasu reakcji) układu

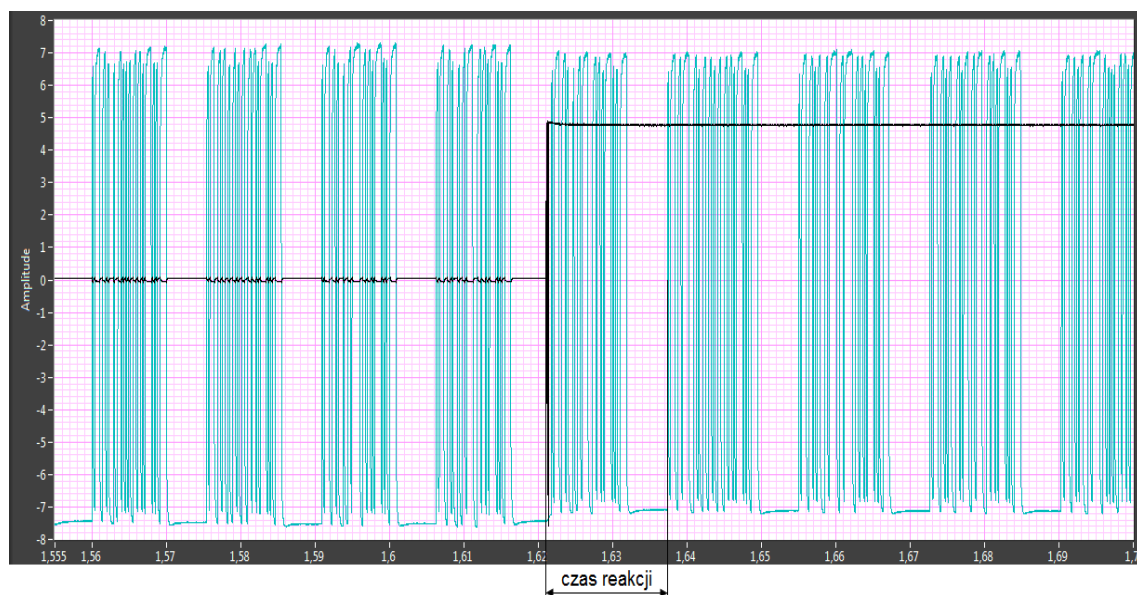
Norma PN-EN 60746-1:2006 definiuje czas odpowiedzi 90 %, T90 jako „przedział czasu od skokowej zmiany wartości mierzonej właściwości do odpowiadającej mu zmiany wartości wskazywanej przekraczającej granicę 90 % amplitudy w odniesieniu do stanu ustalonego (i pozostającej w tym przedziale)” [15].

W tym przypadku definicja ta nie do końca obrazuje charakter działania układu, gdyż wartością na wyjściową są dane cyfrowe w postaci paczek przesyłane do komputera. W związku z tym, w celu wyznaczenia czasu reakcji układu, została użyta karta pomiarowa oraz zbudowane do tego celu oprogramowanie w środowisku LabVIEW. Karta pomiarowa odpowiedzialna jest za generowanie sygnału sinusoidalnego podawanego na wejście przetwornika rezystancja–napięcie oraz za akwizycję danych. Natomiast oprogramowanie w LabVIEW za konfigurację karty oraz rejestrację danych. Takie rozwiązanie zapewnia zarejestrowanie odpowiedniej liczby paczek danych niezbędnych do wyznaczenia czasów reakcji układu. Nie jest to możliwe przy zastosowaniu oscyloskopu, na którym w danej chwili można obserwować maksymalnie 3 paczki danych tak aby jednoznacznie stwierdzić ich zawartość. Do akwizycji danych zostały użyte dwa kanały karty. Pierwszy służył do czytania danych cyfrowych z mikrokontrolera, a drugi do rejestrowania momentu skokowej zmiany sygnału wejściowego. Do dokładnej analizy danych zastał wykorzystany program dostępny w środowisku LabVIEW jako example. Posłużył on do odczytania zarejestrowanych podczas pomiarów danych, zapisanych w specjalnym formacie TDMS.

W przypadku konduktometru wielkością mierzoną jest konduktancja, która jest odwrotnością rezystancji. W celu wyznaczenia czasu reakcji została wykorzystana skokowa zmiana rezystancji na wejściu układu, wywołująca zmianę napięcia na wyjściu. Napięcie to jest mierzone za pomocą układu mikroprocesorowego.

Zatem czas reakcji układu konduktometru jest to czas pomiędzy skokową zmianą rezystancji na wejściu układu, a pojawieniem się danych cyfrowych nie zmieniających się

w określonych granicach do kolejnej zmiany wartości rezystancji na wejściu układu. Ze względu na to, iż ostatnie bity dla przetwornika nie są stabilne, paczki danych nie są jednakowe nawet w stanie ustalonym. Wartość napięcia zmienia się w określonych granicach. W celu dokładnego określenia czy kolejna paczka danych może być uznana za tą, która może reprezentować stan ustalony posłużono się dodatkowo terminalem do odbierania danych z portu COM komputera. Widać było wtedy, iż po skokowej zmianie dla narastania zazwyczaj następna wartość napięcia mogła reprezentować stan ustalony. Natomiast dla opadania zazwyczaj dopiero druga paczka reprezentowała wartość napięcia w stanie ustalonym. Przykład sposobu wyznaczania czasu reakcji na podstawie paczek danych w postaci cyfrowej przedstawiają rysunki 5.1 oraz 5.2. Na podstawie przepro-



RYSUNEK 5.1. Sposób wyznaczania czasu reakcji dla narastania na podstawie danych pomiarowych w postaci cyfrowej

wadzonej serii dwudziestu pomiarów, której wyniki zostały przedstawione w tabelicy 5.1 stwierdza się, iż czas reakcji podczas narastania wartości wyjściowej jest inny niż czas reakcji podczas zmniejszania wartości wyjściowej. Czas podczas opadania jest większy niż podczas narastania. Wynika to z charakteru budowy układu. Ładowanie kondensatora w detektorze wartości szczytowej jest szybkie natomiast jego rozładowanie zależy jeszcze od wartości rezystora, poprzez który ono następuje.

Średni czas reakcji podczas narastania wynosi 13 ms i jednocześnie nie powinien przekraczać 21 ms. Natomiast średni czas reakcji podczas opadania wynosi 24,1 ms i jednocześnie nie powinien przekraczać 32 ms.



RYSUNEK 5.2. Sposób wyznaczania czasu reakcji dla narastania na podstawie danych pomiarowych w postaci cyfrowej (zbliżenie)

Opisany sposób wyznaczania czasów reakcji przeznaczony jest dla pojedynczego kanału pomiarowego, ponieważ dla obu kanałów czasy te będą zbliżone z dokładnością do statystyki.

Panel czołowy jak również schemat blokowy programu zbudowanego w LabVIEW przedstawiają odpowiednie rysunki znajdujące się w załączniku C.

TABLICA 5.1. Wyniki badania dynamiki układu mikroprocesorowego konduktometru wraz z przetwornikiem rezystancja napięcie

Lp.	Czas opadania w [ms]	Czas narastania w [ms]
1	26,2	13,0
2	21,3	10,0
3	27,0	20,3
4	23,2	14,2
5	24,4	6,6
6	26,3	6,0
7	25,0	19,0
8	18,1	8,1
9	27,2	7,8
10	19,8	18,0
11	24,1	9,3
12	18,1	10,3
13	27,5	15,5
14	20,1	16,9
15	30,5	10,3
16	23,9	16,8
17	16,7	19,0
18	24,3	15,2
19	31,8	6,5
20	26,4	17,2
Średnia	24,1	13,0

5.2. Sprawdzenie działania

W celu sprawdzenia działania całego układu konduktometru wszystkie jego elementy musiały zostać zintegrowane. Przetwornik rezystancja–napięcie został podłączony do układu mikroprocesorowego. Natomiast układ mikroprocesorowy poprzez kabel będący przejściówką z RS232 na USB do komputera. Do odczytania i zapisu wysyłanych przez mikroprocesor danych został wykorzystany zbudowany do tego celu program w LabVIEW. Zmienne pole elektryczne pochodziło z generatora funkcyjnego. Wartość międzyszczytowa napięcia podawanego na wejście nieodwracające przetwornika wynosiła 500 mV. Celki konduktometryczne zostały zasymulowane przez opornice dekadowe, których wartości rezystancji były ustawiane tak aby uzyskać odpowiednie wartości wzmocnienia całego układu. Rezystancja sprzężenia zwrotnego przetwornika wynosi $R_s = 475 \Omega$. Zatem aby uzyskać wzmocnienie 2 zgodnie z wzorem (8) wartość rezystancji na dekadzie symulującej celkę

została ustawiona na 475 Ω . Natomiast dla wzmocnienia 10 wartość rezystancji wynosiła 52,8 Ω . Układ sprawdzono dla wzmocnienia 2 oraz 10 dla każdego kanału. Fragmenty plików z wynikami pomiaru przedstawiających działanie układu widoczne są na rysunku 5.3. Wyniki przedstawione na rysunku 5.3 należy podzielić przez 1000 aby uzyskać rzeczywiste wartości napięcia mierzonego przez układ mikroprocesorowy.

a)	465	495	b)	495	2513	c)	2460	468	d)	2428	2460
	468	475		475	2453		2505	475		2438	2470
	465	488		480	2450		2548	485		2485	2490
	480	470		470	2483		2435	470		2438	2438
	480	490		470	2415		2550	493		2520	2483
	488	495		470	2415		2443	465		2475	2403
	475	468		480	2483		2443	483		2428	2415
	478	478		463	2480		2493	465		2503	2483
	475	495		503	2400		2508	475		2493	2410
	475	475		480	2460		2490	470		2488	2428
	483	503		503	2425		2483	490		2425	2450
	465	495		483	2465		2540	480		2483	2390
	465	465		468	2473		2533	488		2470	2508
	478	508		503	2503		2558	473		2485	2405
	500	465		488	2400		2455	475		2430	2458
	493	475		488	2460		2480	500		2423	2478
	488	488		493	2463		2478	483		2445	2415
	490	500		475	2403		2450	465		2483	2475
	475	480		500	2500		2473	485		2493	2415
	500	483		470	2460		2463	480		2500	2400
	498	470		475	2475		2495	498		2475	2463
	480	473		483	2395		2495	485		2448	2440
	480	505		473	2485		2445	470		2548	2478
	473	465		490	2465		2495	465		2495	2405
	488	470		483	2455		2455	480		2463	2510
	473	483		465	2428		2508	463		2558	2398
	483	495		480	2443		2458	498		2485	2453
	468	463		463	2400		2460	480		2510	2470
	485	483		468	2518		2498	485		2440	2475
	465	473		488	2458		2538	498		2465	2383
	498	495		480	2448		2475	493		2520	2440
	485	468		490	2410		2490	460		2483	2488
	468	488		468	2433		2533	493		2463	2423

RYSUNEK 5.3. Fragmenty plików przedstawiające działanie układu konduktometru dla różnych wzmocnień

a – wzmocnienie 2 dla obu kanałów, b – wzmocnienie 2 dla pierwszego kanału i 10 dla drugiego, c – wzmocnienie 10 i 2, d – wzmocnienie 10 dla obu kanałów

Rozdział 6

Wnioski z pracy

6.1. Podsumowanie

Konduktometria to dziedzina nauki zajmująca się badaniem przewodności elektrycznej roztworów. Jak się okazuje po przeczytaniu rozdziału 2 to nie tylko dziedzina, którą zajmować się można w laboratoriach pomiarowych, instytutach naukowych czy podczas zajęć laboratoryjnych na uczelni. Konduktometria znalazła szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Z pewnością jest to dziedzina, która może się jeszcze rozwinąć i warto do tego dążyć, bo nigdy nie wiadomo do czego może ona jeszcze zostać wykorzystana.

Głównym celem projektu było zbudowanie konduktometru do pomiarów dynamicznych. Podstawową właściwością tego urządzenia miała być szybkość działania, aby można było zarejestrować zmianę przewodności w postaci wąskich szpilek. W pierwszej kolejności został wykonany przetwornik rezystancja–napięcia, który zamienia przewodność roztworu na sygnał elektryczny w postaci napięcia. Po wykonaniu szeregu pomiarów ustalono częstotliwość sygnału wejściowego na 10 kHz. Okazało się również, iż nie każdy układ wzmacniacza operacyjnego radzi sobie z przenoszeniem sygnału o wybranej częstotliwości ze względu na wąskie pasmo przenoszenia. Ostatecznie zastosowano układ scalony AD817. Kolejnym elementem całego konduktometru jest układ mikroprocesorowy. Został on oparty o mikrokontroler ATmega16L. Układ ten posiada wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy. Jednak szybkość jego działania nie była zadowalająca. Sygnał wejściowy o częstotliwości 10 kHz powinien być próbkowany z częstotliwością co najmniej 10 razy większą, aby można odwzorować w zadowalający sposób sygnał wejściowy z danych cyfrowych. Natomiast przetwornik wbudowany w mikrokontroler ATmega może próbować sygnał wejściowy z maksymalną częstotliwością ok. 15 kHz. Można byłoby zastosować zewnętrzny przetwornik ADC. Jednak nas interesuje tylko obwódnia sygnału, dlatego też znaleziono inne rozwiązanie. Polegało ono na zastosowaniu układu detektora wartości szczytowej, który sygnał przemienny zamienia na napięcie stałe odpowiadające co do wartości amplitudzie sygnału wejściowego. W przypadku tego układu również wystąpiły pewne problemy związane z odpowiednim doбором wzmacniacza operacyjnego. Niektóre

wzmacniacze obcinały sygnał wyjściowy ze względu na wąskie pasmo przenoszenia lub niesymetryczne zasilanie. Ostatecznie zdecydowano się na układ LF356. W związku z tym częstotliwość próbkowania sygnału nie musiała być już taka duża. Została ona ustalona na ok. 100 Hz dla jednego kanału. Wystarczy ona w zupełności do zarejestrowania szybkich zmian przewodności roztworu. Świadczą o tym również wartości czasu reakcji układu na skokową zmianę sygnału. Kolejnym problemem, który wystąpił podczas realizacji projektu było zasilanie układu detektora wartości szczytowej. Cały układ mikroprocesorowy zasilany jest napięciem 5 V z portu USB komputera. Natomiast do zasilania detektora potrzebne jest napięcie symetryczne oraz wyższe niż 5 V. W związku z tym został zastosowany układ służący do podwyższania i zmiany biegunowości napięcia. Całość jest podłączona do portu szeregowego komputera, na którym dane pomiarowe są odczytywane i archiwizowane.

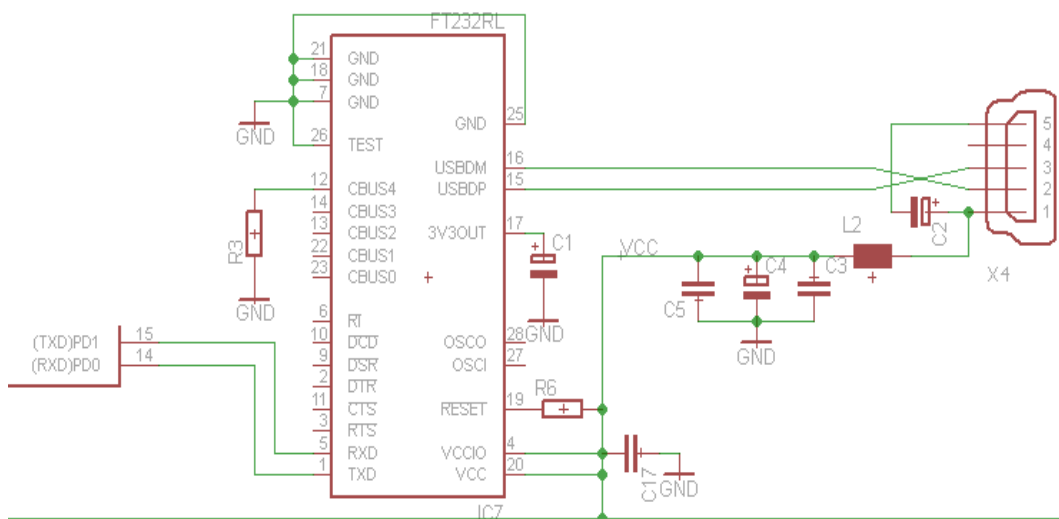
Podczas wykonywania projektu nasunęły się pewne wnioski związane z możliwościami rozwoju projektu. Zostały one opisane w kolejnym podrozdziale.

Podsumowując wszystkie wykonane zadania w porównaniu z zakresem pracy można stwierdzić, iż cel pracy został osiągnięty.

6.2. Możliwości rozwoju projektu

Początkowo zasilanie całego układu mikroprocesorowego miało być zrealizowane za pomocą baterii. Jednak ze względu na to, iż baterie zajmują sporo miejsca oraz trzeba je wymieniać, są dość niepraktyczne. Ostatecznie układ zasilany jest napięciem z portu USB komputera. W tym przypadku na płycie znajduje się port USB oraz RS232, który służy do komunikacji z komputerem. Wszystkie testy i pomiary były prowadzone na takim właśnie układzie. Zostało to już sprawdzone. Do realizacji komunikacji jak i zasilania wystarczyłby port USB. Wiązałoby się to jednak z koniecznością zmian w schemacie elektrycznym oraz przeprojektowaniem płytki PCB. Należałoby zastąpić układ MAX232 układem FT232. Schemat układu komunikacji uwzględniający opisane zmiany przedstawia rysunek 6.1. Nie został on jednak sprawdzony i nie ma gwarancji, że w przedstawionej postaci będzie działał prawidłowo. Dodatkowo układy typu FT232 wykonywane są w technologii SMD. Zatem nie można zrealizować prototypu takiego układu komunikacji na zwykłej płytce stykowej. Ze względu na ograniczony czas realizacji pracy dyplomowej, zmiany

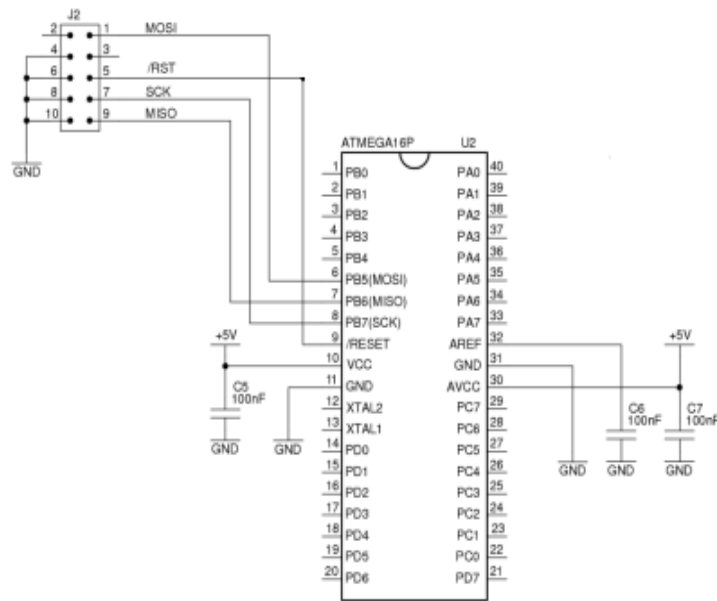
te nie zostały w praktyce uwzględnione w układzie mikroprocesorowym. Został jednak wykonany schemat oraz projekt płytki PCB.



RYSUNEK 6.1. Schemat układu komunikacji z wykorzystaniem układu FT232RL

Kolejną rzeczą, którą można byłoby uwzględnić w projekcie to dodanie gniazda KANDA. Dałoby to możliwość programowania mikrokontrolera ATmega bez konieczności wyjmowania go z całego układu. W trakcie realizacji dyplomu procesor programowany był w układzie zmontowanym na płytce stykowej. Schemat tego układu przedstawia rysunek 6.2. Cały schemat oraz projekt płytki uwzględniające opisane możliwości zmian znajdują się w załączniku B.

Ostatnia już sprawa poprawy działania projektu dotyczy jego parametrów dynamicznych. Rozdział 5.1 dotyczy metody wyznaczania czasu odpowiedzi układu. Przedstawione w nim wyniki można zdecydowanie poprawić zmieniając szybkość transmisji danych. Badania zostało przeprowadzone dla prędkości transmisji 4800 baud. Natomiast układ został ostatecznie zaprogramowany na prędkość transmisji 38400 baud. Zatem przedstawione wyniki mogą być lepsze. Aby dokładnie wyznaczyć czasy odpowiedzi układu należy przebadать układ wg metody opisanej w rozdziale 5.1.



RYSUNEK 6.2. Schemat podłączenia zasilania oraz gniazda programatora do układu ATmega16L

Bibliografia

- [1] Z. Moroń: *Pomiary przewodności elektrycznej cieczy przy małych częstotliwościach*, Wrocław 2003
- [2] K. Pigoń, Z. Ruziewicz: *Chemia fizyczna. Część 1*, Warszawa 1993
- [3] A. Kiswa: *Elektrochemia I. Jonika*, Warszawa 2000
- [4] E. Romer: *Miernictwo przemysłowe*, Warszawa 1978
- [5] C. H. Hamann, A. Hamnett, W. Vielstich: *Electrochemistry*, 2000
- [6] W. Szczepaniak: *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*, Warszawa 2008
- [7] W. Libuś, Z. Libuś: *Elektrochemia*, Warszawa 1987
- [8] European Medicines Agency: *Note for guidance on quality of water for pharmaceutical use*, London 2002
- [9] M. Kucharski: *Konduktometryczny pomiar hematokrytu*, Poznań 2009
- [10] PN-EN 24006 PN-ISO 4006: *Pomiar strumienia płynu i objętości przepływającego płynu w przewodach*
- [11] E. Iller: *Badania znacznikowe w inżynierii procesowej*, Warszawa 1992
- [12] J. Wiora, W. Błotnicki, A. Wiora, R. Kleszczewski: *Zastosowanie pomiaru konduktometrycznego do określania wielkości przepływu metodą znacznikową*
- [13] Atmel Corporation, 2325 Orchard Parkway; San Jose, USA: *8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash Manual – ATmega16/ATmega16L*, 2008
- [14] U. Tietze, Ch. Schenk: *Układy półprzewodnikowe*, Warszawa 1996
- [15] PN-EN 60746-1:2006: *Określenie właściwości analizatorów elektrochemicznych. Część 1: Postanowienia ogólne*
- [16] J. Iciek, M. Ludwicki, A. Jezierski: *Konduktywność roztworów cukrowo-wapiennych – modelowanie z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*, Gazeta Cukrownicza 5/2006
- [17] M. Ludwicki: *Konduktometryczne określanie gęstości mleka wapiennego*, Gazeta Cukrownicza 8/2006

Dodatek A

Dane pomiarowe

TABLICA A.1. Badanie pasma przenoszenia wzmacniacza $\mu A741$

A = 2, Rc = 100 Ω , Rs = 100 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,506	1,006	1,99	5,97	0
1	0,512	1,000	1,95	5,82	0
10	0,506	1,012	2	6,02	0
100	0,506	1,006	1,99	5,97	0
1000	0,503	1,006	2	6,02	0
10000	0,512	0,993	1,94	5,75	-2,1
100000	0,503	0,950	1,89	5,52	-14,5
1000000	0,503	0,350	0,7	-3,15	-91
A = 5, Rc = 100 Ω , Rs = 400 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,509	2,531	4,97	13,93	0
1	0,512	2,569	5,02	14,01	0
10	0,506	2,484	4,91	13,82	0
100	0,503	2,453	4,88	13,76	0
1000	0,503	2,438	4,85	13,71	0
10000	0,506	2,454	4,85	13,71	-2,8
100000	0,503	2,422	4,82	13,65	-31
1000000	0,503	0,375	0,75	-2,55	-93
A = 10, Rc = 100 Ω , Rs = 900 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,512	5,000	9,77	19,79	0
1	0,512	4,969	9,71	19,74	0
10	0,506	4,969	9,82	19,84	0
100	0,503	4,969	9,88	19,89	0
1000	0,503	4,969	9,88	19,89	0
10000	0,503	4,938	9,82	19,84	-5,3
100000	0,503	3,344	6,65	16,45	-49
1000000	0,503	0,384	0,76	-2,35	-95

A = 20, R _c = 100 Ω, R _s = 1900 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	φ [deg]
0,1	0,512	10,00	19,53	25,82	0
1	0,512	9,987	19,51	25,80	0
10	0,506	9,938	19,64	25,86	0
100	0,506	9,938	19,64	25,86	0
1000	0,503	9,884	19,65	25,87	-2
10000	0,503	9,750	19,38	25,75	-11
100000	0,503	2,859	5,68	15,09	-45
1000000	0,503	0,381	0,757	-2,41	-92
A = 50, R _c = 100 Ω, R _s = 4900 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	φ [deg]
0,1	0,400	19,06	47,65	33,56	0
1	0,400	19,06	47,65	33,56	0
10	0,400	19,22	48,05	33,63	-1
100	0,400	19,22	48,05	33,63	-1
1000	0,400	19,06	47,65	33,56	-2,5
10000	0,400	17,81	44,52	32,97	-22
100000	0,400	3,50	8,75	18,84	-81

f – częstotliwość sygnału wejściowego, U_{we} – wartość międzyszczytowa napięcia wejściowego, U_{wy} – wartość międzyszczytowa napięcia wyjściowego, A – wzmacnienie wzmacniacza A_r – wzmacnienie rzeczywiste wzmacniacza, φ – przesunięcie fazowe

TABLICA A.2. Wyniki pomiarów dla elektrody CD-21 w układzie przetwor-
nika z wzmacniaczem $\mu A741$ ($R_s = 1000 \Omega$)

Roztwór o maksymalnym stężeniu					
f [Hz]	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	A_r	A_r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,205	0,459	2,24	7,00	41
0,2	0,205	0,684	3,34	10,47	48
0,5	0,205	1,281	6,25	15,92	61
1	0,205	2,156	10,52	20,44	63
2	0,205	3,656	17,83	25,03	61
5	0,205	7,000	34,15	30,67	54
10	0,205	10,50	51,22	34,19	42
20	0,205	14,00	68,29	36,69	32
50	0,205	17,34	84,59	38,55	18
100	0,205	18,75	91,46	39,22	11
200	0,205	19,53	95,27	39,58	7
500	0,205	20,47	99,85	39,99	3
1000	0,205	20,94	102,1	40,18	-2
2000	0,205	21,09	102,9	40,25	-8
5000	0,205	19,84	96,78	39,72	-23
10000	0,205	16,09	78,49	37,90	-43
20000	0,205	10,12	49,37	33,87	-64
50000	0,205	4,406	21,49	26,65	-79
100000	0,205	2,234	10,90	20,75	-85
200000	0,205	1,156	5,64	15,02	-89
Woda z kranu					
f [Hz]	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	A_r	A_r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,205	0,291	1,42	3,04	16
0,2	0,205	0,325	1,59	4,00	10
0,5	0,205	0,359	1,75	4,87	9
1	0,205	0,381	1,86	5,38	7
2	0,205	0,394	1,92	5,67	5
5	0,205	0,412	2,01	6,06	3
10	0,205	0,419	2,04	6,21	2
20	0,205	0,425	2,07	6,33	0
50	0,205	0,431	2,10	6,45	0
100	0,205	0,425	2,07	6,33	0
200	0,205	0,428	2,09	6,39	0
500	0,205	0,425	2,07	6,33	0
1000	0,205	0,428	2,09	6,39	0
2000	0,205	0,428	2,09	6,39	0
5000	0,205	0,425	2,07	6,33	0
10000	0,205	0,428	2,09	6,39	-0,7
20000	0,205	0,425	2,07	6,33	-1
50000	0,205	0,428	2,09	6,39	-3
100000	0,205	0,428	2,09	6,39	-7
200000	0,205	0,425	2,07	6,33	-13
500000	0,205	0,409	2,00	6,00	-40
1000000	0,205	0,279	1,36	2,68	-78

TABLICA A.3. Wyniki pomiarów dla elektrody EPS 2ZM w układzie przetwornika z wzmacniaczem $\mu A741$ ($R_s = 1000 \Omega$)

Roztwór o maksymalnym stężeniu					
f [Hz]	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	A_r	A_r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,203	0,234	1,15	1,23	-6
0,2	0,203	0,231	1,14	1,12	-3
0,5	0,203	0,241	1,19	1,49	-1
1	0,203	0,241	1,19	1,49	1
2	0,203	0,241	1,19	1,49	3
5	0,203	0,268	1,32	2,41	9
10	0,203	0,296	1,46	3,28	20
20	0,203	0,365	1,80	5,10	37
50	0,203	0,603	2,97	9,46	57
100	0,203	0,975	4,80	13,63	63
200	0,203	1,641	8,08	18,15	66
500	0,203	3,312	16,32	24,25	63
1000	0,203	5,531	27,25	28,71	-58
2000	0,203	8,938	44,03	32,87	50
5000	0,203	16,41	80,84	38,15	25
10000	0,203	20,78	102,4	40,20	-19
20000	0,203	12,00	59,11	35,43	-49
50000	0,203	4,625	22,78	27,15	-82
100000	0,203	2,281	11,24	21,01	-88
200000	0,203	1,169	5,76	15,21	-92
Woda z kranu					
f [Hz]	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	A_r	A_r [dB]	ϕ [deg]
0,1	0,205	0,209	1,02	0,17	0
0,2	0,205	0,206	1,00	0,04	0
0,5	0,205	0,208	1,01	0,13	1
1	0,205	0,214	1,04	0,37	2
2	0,205	0,218	1,06	0,53	3
5	0,205	0,225	1,10	0,81	6
10	0,205	0,236	1,15	1,22	9
20	0,205	0,256	1,25	1,93	12
50	0,205	0,291	1,42	3,04	15
100	0,205	0,326	1,59	4,03	16
200	0,205	0,373	1,82	5,20	17
500	0,205	0,450	2,20	6,83	18
1000	0,205	0,509	2,48	7,90	14
2000	0,205	0,568	2,77	8,85	12
5000	0,205	0,616	3,00	9,56	7
10000	0,205	0,641	3,13	9,90	3
20000	0,205	0,659	3,21	10,14	-1
50000	0,205	0,668	3,26	10,26	-4
100000	0,205	0,671	3,27	10,30	-11
200000	0,205	0,650	3,17	10,02	-24
500000	0,205	0,478	2,33	7,35	-59
1000000	0,205	0,270	1,32	2,39	-90

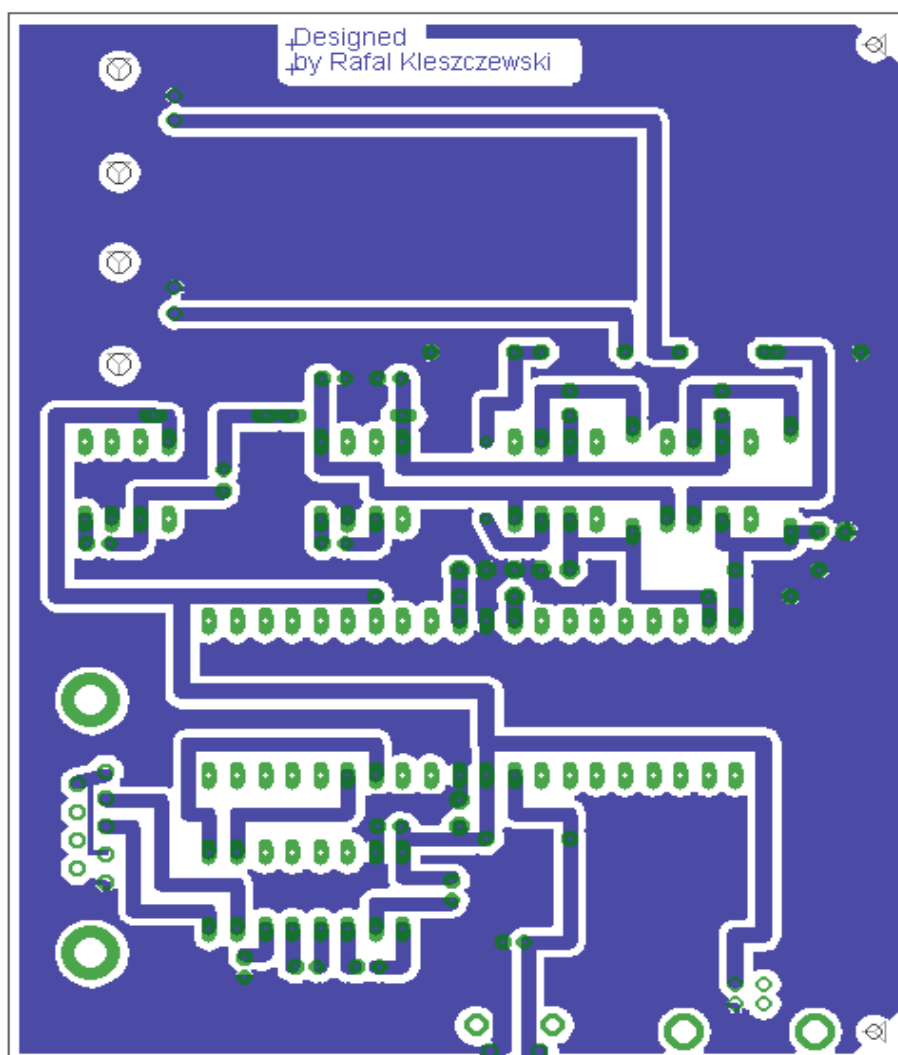
TABLICA A.4. Badanie pasma przenoszenia wzmacniacza AD817

A = 2, R _c = 1000 Ω , R _s = 1000 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
1	1,019	2,031	1,99	5,99	-2
2	1,019	2,031	1,99	5,99	0
5	1,019	2,031	1,99	5,99	-1,5
10	1,019	2,031	1,99	5,99	-2
20	1,019	2,031	1,99	5,99	0
50	1,019	2,031	1,99	5,99	-2
100	1,019	2,016	1,98	5,93	0
200	1,019	2,016	1,98	5,93	-1,5
500	1,019	2,016	1,98	5,93	0
1000	1,019	2,010	1,97	5,90	-1,5
2000	1,019	2,016	1,98	5,93	0
5000	1,019	2,016	1,98	5,93	-2
10000	1,019	2,016	1,98	5,93	-1
20000	1,019	2,000	1,96	5,86	0
50000	1,019	2,000	1,96	5,86	0
100000	1,019	2,000	1,96	5,86	0
200000	1,019	2,000	1,96	5,86	-1
500000	1,019	2,047	2,01	6,06	-6
A = 10, R _c = 100 Ω , R _s = 900 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
1	0,500	5,031	10,06	20,05	0
2	0,500	5,031	10,06	20,05	-1,5
5	0,500	5,031	10,06	20,05	0
10	0,500	5,031	10,06	20,05	0
20	0,500	5,031	10,06	20,05	0
50	0,500	5,031	10,06	20,05	0
100	0,500	5,031	10,06	20,05	0
200	0,500	5,000	10,00	20,00	0
500	0,500	5,000	10,00	20,00	0
1000	0,500	5,000	10,00	20,00	0
2000	0,500	5,000	10,00	20,00	0
5000	0,500	5,000	10,00	20,00	0
10000	0,500	5,000	10,00	20,00	0
20000	0,500	4,969	9,94	19,95	-1
50000	0,500	4,938	9,88	19,89	-1,5
100000	0,500	4,938	9,88	19,89	-2
200000	0,500	4,938	9,88	19,89	-3
500000	0,500	4,606	9,21	19,29	-9

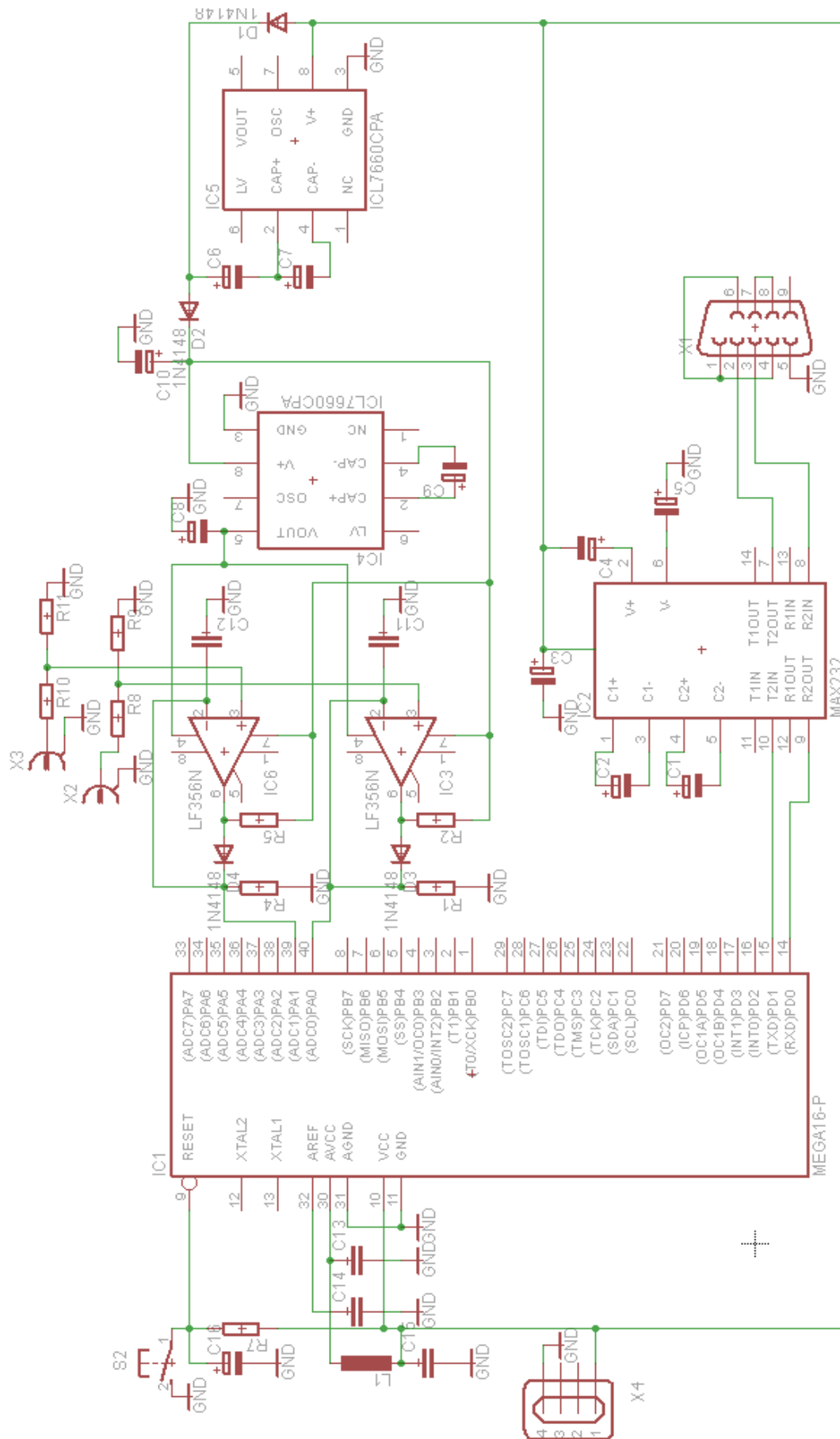
A = 50, Rc = 100 Ω , Rs = 4900 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
1	0,406	19,84	48,87	33,78	0
2	0,406	19,84	48,87	33,78	0
5	0,406	19,84	48,87	33,78	0
10	0,406	19,84	48,87	33,78	0
20	0,406	19,84	48,87	33,78	1
50	0,406	19,84	48,87	33,78	0
100	0,406	19,84	48,87	33,78	0
200	0,406	19,84	48,87	33,78	0
500	0,406	19,69	48,50	33,71	0
1000	0,406	19,84	48,87	33,78	0
2000	0,406	19,84	48,87	33,78	0
5000	0,406	19,69	48,50	33,71	1
10000	0,406	19,69	48,50	33,71	0
20000	0,406	19,69	48,50	33,71	-2
50000	0,406	19,06	46,95	33,43	-8
100000	0,406	18,12	44,63	32,99	-17
200000	0,406	15,78	38,87	31,79	-28
A = 100, Rc = 50 Ω , Rs = 4950 Ω					
f [Hz]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]	A _r	A _r [dB]	ϕ [deg]
1	0,203	19,69	97,00	39,73	0
2	0,203	19,69	97,00	39,73	1
5	0,203	19,84	97,73	39,80	0
10	0,203	19,69	97,00	39,73	0
20	0,203	19,84	97,73	39,80	0
50	0,203	19,84	97,73	39,80	0
100	0,203	20,00	98,52	39,87	0
200	0,203	19,69	97,00	39,73	0
500	0,203	19,69	97,00	39,73	0
1000	0,203	19,69	97,00	39,73	0
2000	0,203	19,69	97,00	39,73	0
5000	0,203	19,69	97,00	39,73	0
10000	0,203	19,69	97,00	39,73	-1
20000	0,203	19,38	95,47	39,60	-4
50000	0,203	18,75	92,36	39,31	-15
100000	0,203	17,19	84,68	38,56	-28

Dodatek B

Schematy elektryczne

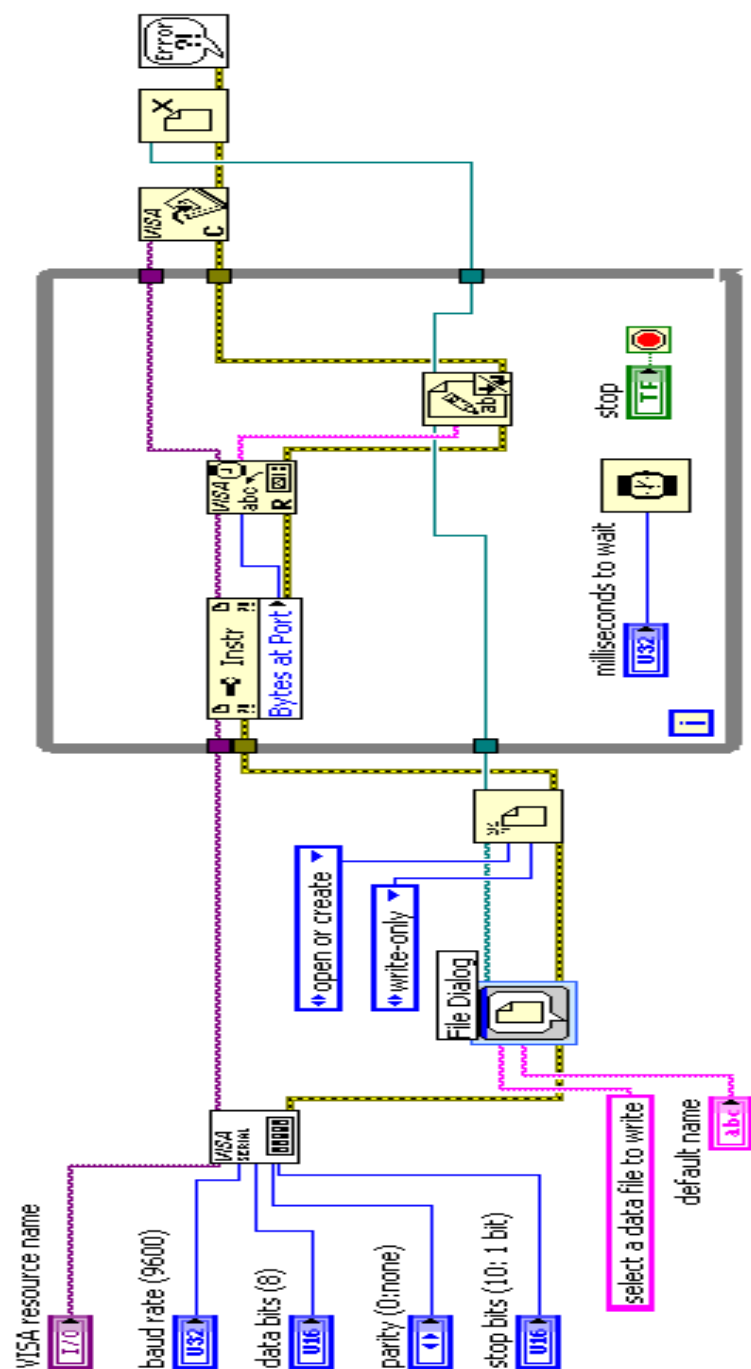


RYSUNEK B.1. Mozaika ścieżek układu mikroprocesorowego

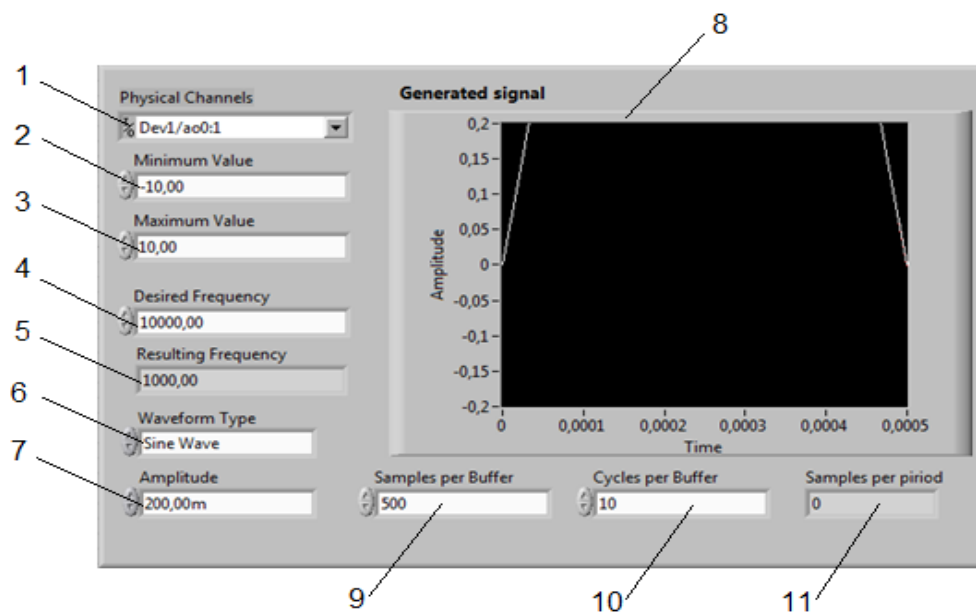


RYSUNEK B.2. Schemat elektryczny układu mikroprocesorowego

Dodatek C Schematy i rysunki z LabVIEW

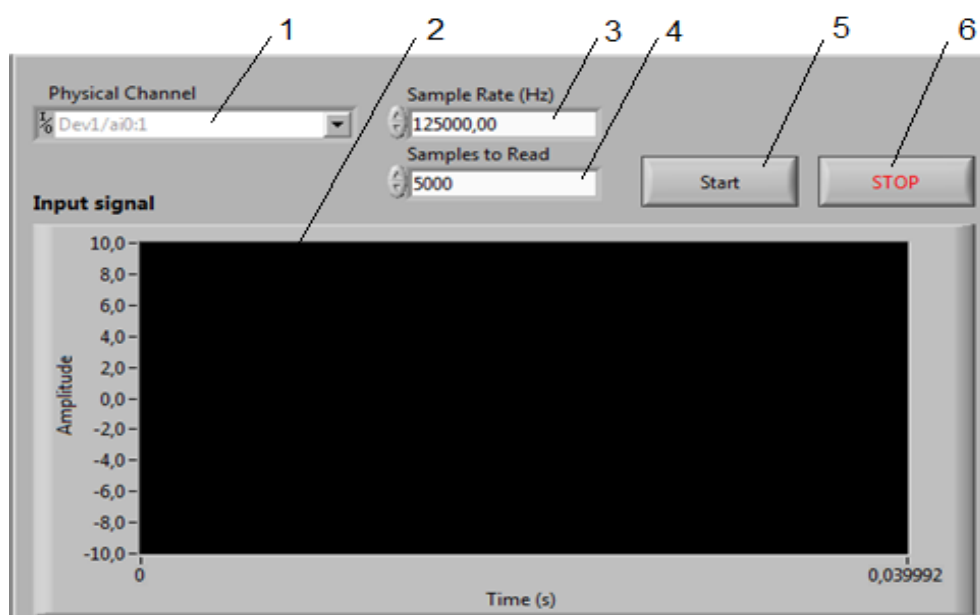


RYSUNEK C.1. Schemat blokowy programu do zapisu danych do pliku



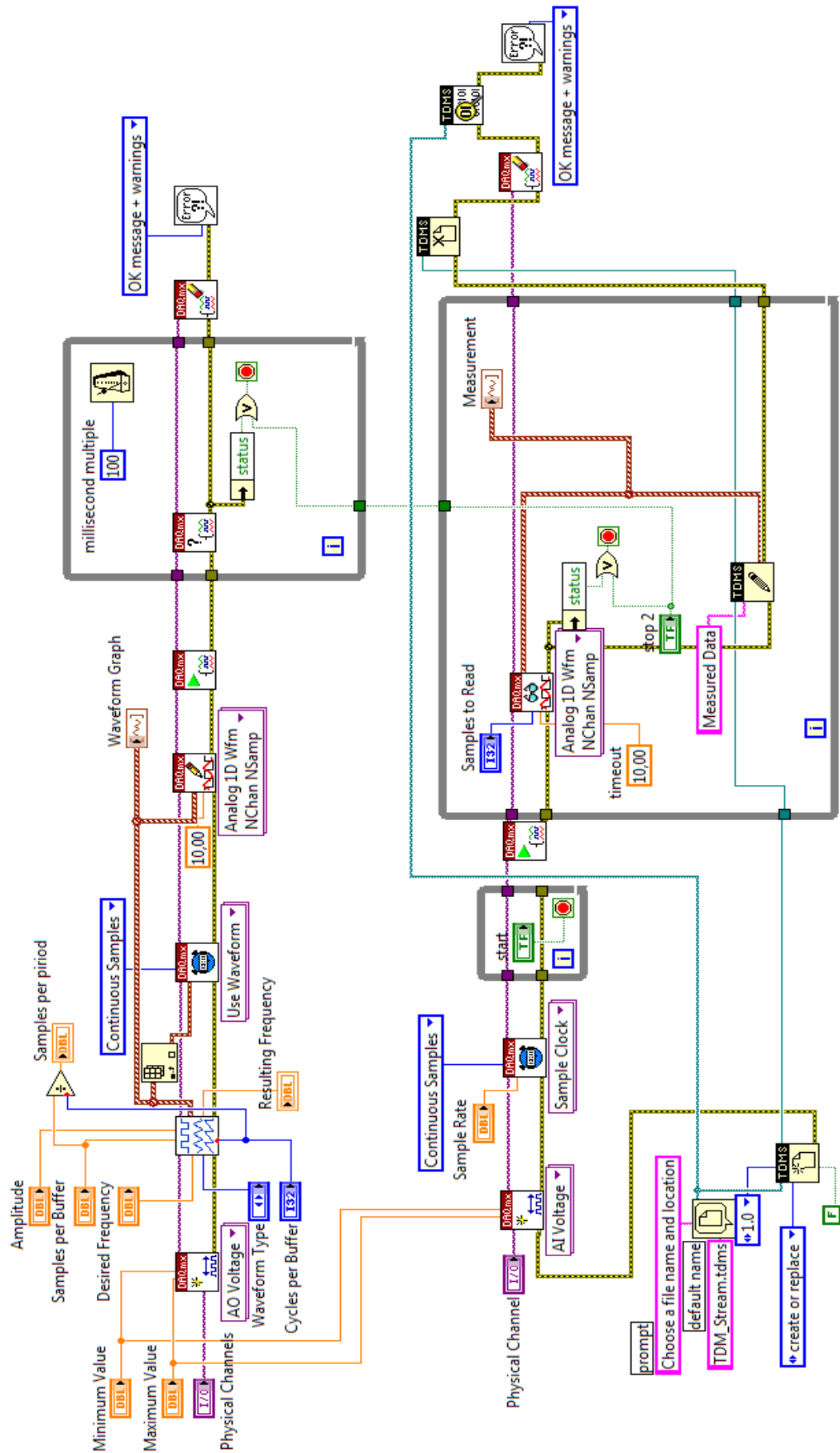
RYSUNEK C.2. Część panelu czołowego programu służącego do wyznaczania czasu reakcji odpowiedzialna za generowanie sygnału

1 – wybór kanału karty dla generatora, 2 – maksymalna wartość amplitudy generowanego sygnału, 3 – minimalna wartość generowanego sygnału, 4 – pożądana częstotliwość sygnału, 5 – wyjściowa częstotliwość sygnału, 6 – kształt generowanego przebiegu, 7 – amplituda sygnału, 8 – przebieg sygnału, 9 – liczba próbek wyświetlana na wykresie, 10 – liczba wyświetlanych cykli, 11 – liczba próbek na jeden okres



RYSUNEK C.3. Część panelu czołowego programu służącego do wyznaczania czasu reakcji odpowiedzialna za pomiar danych wejściowych

1 – wybór kanałów karty dla sygnałów wejściowych, 2 – przebieg sygnałów wejściowych, 3 – częstotliwość próbkowania sygnału dla pojedynczego kanału, 4 – liczba próbek przedstawiana na wykresie, 5 – przycisk załączający generowanie sygnału oraz zczytywanie danych, 6 – przycisk zatrzymujący działanie programu



RYSUNEK C.4. Schemat blokowy programu służącego do wyznaczania czasu reakcji

Dodatek D

Listing programu

```
1 /*
2     Rafał Kleszczewski
3     Systemy Pomiarowe 2010/2011
4
5 /* atmega16L (8MHz) */
6 #define F_CPU 8000000UL
7 /*wybór napięcia referencyjnego (wewnętrzne napięcie referencyjne 2.56V) */
8 #define ADC_VREF_TYPE 0xC0
9 #include <stdio.h>
10 #include <avr/io.h>
11 #include <util/delay.h>
12 #include <math.h>
13 #include <avr/interrupt.h>
14
15 /* Prędkość transmisji 38400 */
16 #define BAUD 38400UL
17 #define MYUBRR (F_CPU/(BAUD*16)-1)
18
19 /* Inicjuje port szeregowy AVRa */
20 void USART_init(unsigned int myubrr)
21 {
22     /* Ustala prędkość transmisji */
23     UBRRH = (unsigned char)(myubrr>>8);
24     UBRL = (unsigned char)myubrr;
25
26     /* Włącza nadajnik */
27     UCSRB = (1<<TXEN);
28
29     /* Format ramki: 8 bitów danych, 1 bit stopu, brak
30     bitu parzystości */
31     UCSRC = (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0);
32 }
33
34 /* Funkcje transmisji danych */
35 int USART_Transmit(char data)
36 {
37     /* Czekanie aż bufor transmisji będzie pusty */
38     while ( !( UCSRA & (1<<UDRE)) )
39         ;
40     /* Umieszczanie danych w buforze, wysyłanie danych */
41     UDR = data;
42     return 0;
```

```
43 }
44
45 void write_text_RAM(char * tekst)
46 {
47     int i = 0;
48     while(tekst[i]!=0)
49     {
50         USART_Transmit(tekst[i]);
51         i++;
52     }
53 }
54
55 /* Funkcje przetwornika A/C */
56 void Inicjalizacja( void )
57 {
58     /* Wybór napięcia referencyjnego
59     (wewnętrzne napięcie referencyjne 2.56V) */
60     ADMUX |= _BV(REFS0)|_BV(REFS1);
61
62     /* Początkowe ustawienie kanału wejścia – PC1 (ADC1) */
63     ADMUX |= _BV(MUX0);
64
65     /* Zezwolenie na konwersję */
66     ADCSRA |= _BV(ADEN);
67
68     /* Wybranie częstotliwości dla taktowania przetwornika
69     (ustawienie prescalera) */
70     ADCSRA |= _BV(ADPS0);
71     ADCSRA |= _BV(ADPS1);
72     ADCSRA |= _BV(ADPS2);
73 }
74
75
76 /* GŁÓWNA FUNKCJA */
77 int main(void)
78 {
79     unsigned int pomiar; /* Zmienna przechowująca odczyt z ADC */
80     unsigned int wynik0;
81     unsigned int wynik1;
82     unsigned int licznik;
83     char temp_str1[3];
84     char temp_str2[3];
85
86     /* Inicjalizuje port szeregowy AVRa */
87     Inicjalizacja();
88     USART_init(MYUBRR);
89
90     /* Główna pętla */
91     while(1)
92     {
```



```
93     ADCSRA |= _BV(ADSC);    /* Rozpoczęcie przetwarzania */
94
95     /* Oczekiwanie na zakończenie przetwarzania */
96     while( bit_is_set(ADCSRA,ADSC))
97     {};
98         pomiar=(int)(ADCL | (ADCH << 8));
99         licznik++;
100
101     if(licznik==20) /* Co czterdziesty (2 kanały x 20) pomiar
102     na jeden kanał jest przesyłany do komputera */
103     {
104         if( bit_is_set(ADMUX,MUX0))
105         {
106             wynik0=pomiar;
107             wynik0=round(pomiar*2.5);
108             /* Zamiana na string */
109             itoa(wynik0,temp_str1,10);
110
111             /* Wysyłanie do komputera */
112             write_text_RAM(temp_str1);
113             write_text_RAM("\t");
114             ADMUX &=~_BV(MUX0);
115         }
116         else
117         {
118             wynik1=pomiar;
119             wynik1=round(pomiar*2.5);
120             itoa(wynik1,temp_str2,10);
121
122             write_text_RAM(temp_str2);
123             write_text_RAM("\n");
124             ADMUX |= _BV(MUX0);
125         }
126         licznik=0;
127     }
128 }
129
130 }
131
132 }
```