

DYDAKTYCZNY SYSTEM POMIAROWY DO WSPÓŁPRACY Z CZUJNIKAMI TENSOMETRYCZNYMI

Leszek FURMANKIEWICZ¹, Marcin SAWICKI²

1. Uniwersytet Zielonogórski
tel.: 68 32 82 234, e-mail: l.furmankiewicz@imei.uz.zgora.pl
2. Uniwersytet Zielonogórski
tel.: +48 604 947 367, e-mail: 87228@stud.uz.zgora.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt i budowę systemu pomiarowego przystosowanego do współpracy ze stanowiskiem dydaktycznym, znajdującym się na wyposażeniu Laboratorium Przetworników i Systemów Pomiarowych Instytutu Metrologii, Elektroniki i Informatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zaproponowany system pozwala na badania tensometrów i układów mostkowych. Składa się on ze stanowiska dydaktycznego, rozbudowanego wzmacniacza tensometrycznego oraz aplikacji na komputer PC, która pozwala na sterowanie tym wzmacniaczem poprzez interfejs szeregowy. Artykuł zawiera: koncepcję systemu pomiarowego, strukturę blokową wzmacniacza, rozwiązania techniczne wybranych bloków funkcjonalnych, wyniki badań torów pomiarowych oraz właściwości aplikacji przeznaczonej do współpracy z urządzeniem.

Słowa kluczowe: wzmacniacz tensometryczny, pomiary mostkowe, pomiary tensometryczne.

1. WPROWADZENIE

Nieustanny rozwój metod pomiaru wielkości nieelektrycznych sprawił, że obecnie na rynku jest dostępnych wiele odmian czujników i układów kondycjonowania sygnałów, czyli urządzeń, których zadaniem jest zamiana wybranej wielkości fizycznej na łatwą do pomiaru wielkość elektryczną [1]. Mnogość zjawisk wykorzystywanych do tego celu i złożoność niektórych konstrukcji wymaga szczegółowej wiedzy teoretycznej i praktycznej od osób zajmujących się projektowaniem lub zastosowaniem urządzeń tego typu. Proces kształcenia takich osób wymaga zatem kompleksowego podejścia, które zapewni równoległe zdobywanie wiedzy i umiejętności praktycznych. Fakt ten jest uwzględniony na uczelniach wyższych, dlatego szczególnie ważną formą nauki w tego typu ośrodkach są zajęcia laboratoryjne.

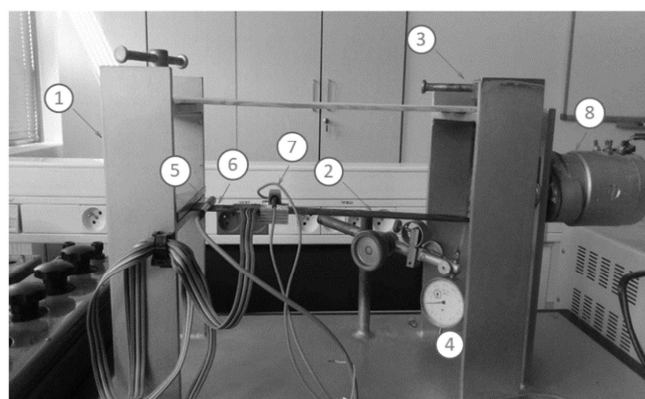
W ramach klasycznych zajęć laboratoryjnych studenci korzystają z odpowiednio wyposażonej pracowni, w której samodzielnie przygotowują stanowisko pomiarowe, obsługują aparaturę, wykonują pomiary i opracowują uzyskane wyniki [2]. Innym podejściem, które w ostatnim czasie zyskuje na popularności, są tzw. laboratoria wirtualne lub zdalne. Umożliwiają one przeprowadzenie zajęć na odległość, czyli bez fizycznej obecności w pracowni. W tym przypadku prowadzone eksperymenty mogą być realizowane poprzez symulacje komputerowe (laboratorium wirtualne) lub zdalny dostęp do rzeczywistej

aparatury (laboratorium zdalne). W pierwszym przypadku otrzymane dane są efektem obliczeń matematycznych, natomiast w drugim wynikami rzeczywistych pomiarów, które zostały zebrane przez aparaturę i wysłane do użytkownika [3].

W artykule przedstawiono wyniki prac projektowych dotyczących systemu pomiarowego zaprojektowanego do współpracy ze stanowiskiem dydaktycznym służącym do badania czujników tensometrycznych. Zaprojektowany system pomiarowy został zrealizowany na potrzeby Laboratorium Przetworników i Systemów Pomiarowych Instytutu Metrologii, Elektroniki i Informatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego. System umożliwi przeprowadzenie zajęć eksperymentalnych w trybie klasycznym oraz budowę tzw. laboratorium zdalnego - ze zdalnym dostępem do rzeczywistej aparatury.

2. STANOWISKO DYDAKTYCZNE

Dydaktyczne stanowisko pomiarowe zostało zrealizowane w postaci układu nazywanego w literaturze belką prostą [1][4]. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do badania czujników tensometrycznych: 1 – stalowa rama, 2 – odkształcany płaskownik, 3 – śruba o małym skoku gwintu, 4 – mikrometr, 5 – czujnik Pt100, 6 – tensometry, 7 – grzałka, 8 – silnik

Konstrukcja nośna stanowiska została wykonana ze stalowej ramy, osadzonej na płycie stojącej

podstawę urządzenia. W ramie zamontowano stalowy płaskownik o długości $l=305$ mm i grubości $h=2,3$ mm, który jest odkształcany za pomocą ręcznie wkręcanej śruby o małym skoku gwintu. Aktualna wartość ugięcia płaskownika jest mierzona za pomocą mikrometru, co pozwala na wyznaczenie jego naprężenia zgodnie z zależnością (1) [5].

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{3fh}{2l^2} \quad (1)$$

gdzie: σ – naprężenie, ε – odkształcenie względne, E – moduł Younga ($E = 2,07 \cdot 10^{11}$ N/m²), f – ugięcie belki, h – grubość belki, l – długość belki.

Na uginaną belkę zostały naklejone cztery tensometry, dwa na jej górnej części oraz dwa na dolnej. Podczas ugięcia belki jedna para czujników zostaje ściskana, a druga rozciągana. Badając zmiany rezystancji czujników można wyznaczyć ich stałą tensometryczną zgodnie z zależnością (2).

$$K = \frac{l \Delta R}{\varepsilon R} = \frac{2l^2 \Delta R}{3fh R} \quad (2)$$

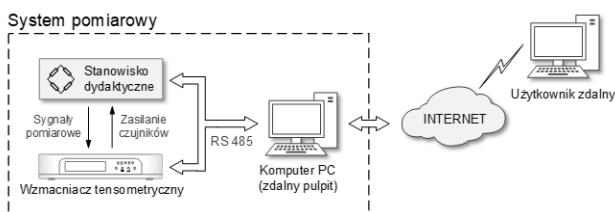
gdzie: K – stała tensometru, $\Delta R/R$ – względna zmiana rezystancji tensometru.

Dodatkowo stanowisko zostało wyposażone w silnik, który pozwala na sterowanie ugięciem metalowego płaskownika w sposób automatyczny oraz w grzałkę i czujnik Pt100, które umożliwiają badanie wpływu temperatury na pracę tensometrów.

3. SYSTEM POMIAROWY

3.1. Koncepcja systemu

Założono, że system pomiarowy będzie współpracował ze stanowiskiem dydaktycznym opisanym w rozdziale 2.



Rys. 2. Struktura systemu pomiarowego

W strukturze systemu pomiarowego (rys. 2) można wyróżnić trzy bloki funkcjonalne: stanowisko dydaktyczne, wzmacniacz tensometryczny oraz serwer (komputer PC). Zastosowanie modułowej konstrukcji pozwala na dowolne modyfikacje, zależne od aktualnych potrzeb. Przykładowo, gdy zajęcia są przeprowadzane w trybie stacjonarnym możliwe jest wykorzystanie tylko stanowiska dydaktycznego i wzmacniacza tensometrycznego, natomiast uzupełnienie systemu o komputer umożliwia akwizycję wyników pomiarów i przeprowadzenie zajęć w trybie zdalnym. Ponadto rozdzielenie funkcji stanowiska i wzmacniacza tensometrycznego pozwala na badanie różnych typów czujników (wymiany wymaga jedynie stanowisko pomiarowe). Takie rozwiązanie wymaga jednak autonomicznego stanowiska, którego pracą można sterować niezależnie od urządzenia pomiarowego.

3.2. Wzmacniacz tensometryczny

Podczas formułowania założeń przyjęto zasadę, że wzmacniacz tensometryczny musi spełnić wszystkie wymagania stawiane komercyjnym konstrukcjom tego typu. Ponadto urządzenie powinno posiadać dodatkowe funkcje, które ułatwią przeprowadzenie zajęć laboratoryjnych. W przeciwieństwie do standardowych konstrukcji tego typu, projekt zakłada możliwość wykonania pomiaru rezystancji i temperatury czujników. Kolejnym niestandardowym rozwiązaniem jest możliwość przeprowadzenia pomiarów we wszystkich konfiguracjach mostkowych, także w układzie ćwierć mostka. Dodatkowo uwzględniono fakt, że układ będzie używany przez studentów, dlatego zdecydowano się na dodanie zabezpieczeń przed niewłaściwym użytkowaniem urządzenia oraz umożliwiono identyfikację niewłaściwych stanów pracy, np. przerwy / zwarcia w obwodzie zasilania mostka. Zdecydowano się również na zastosowanie 8 zakresów pomiarowych, które umożliwią współpracę z różnymi typami czujników. Komunikacja z urządzeniem odbywać się będzie za pomocą protokołu Modbus RTU, co pozwoli na zdalną obsługę, np. ustawienie zakresu pomiarowego, trybu pracy, załączenie alarmu, odczytanie ostatniego pomiaru lub zmianę aktualnie wyświetlanego obrazu na wyświetlaczu urządzenia. Wybrane założenia projektowe dla wzmacniacza tensometrycznego zebrano w tablicy 1.

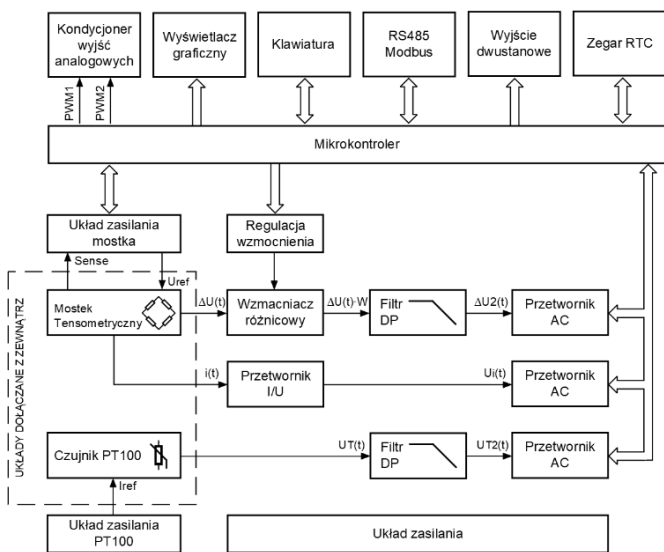
Tablica 1. Założenia projektowe dla wzmacniacza tensometrycznego

Zakres pomiarowy	$\pm (2000, 1000, 500, 250, 20, 10, 5, 2,5)$ mV
Zasilanie czujników	5 V, 2,5 V DC
Układ (dla pomiarów mostkowych)	Ćwierć mostek, pół mostek, pełny mostek
Czujniki	120 Ω ÷ 1000 Ω
Rozdzielczość	260 000 działek (przetwornik 18 bit)
Kompatybilny z czujnikami	- tensometryczne, - potencjometryczne, - DC/DC.
Tryb pomiaru	- ciągły, - na żądanie (ograniczenie efektu podgrzewania czujników).
Komunikacja	- Modbus RTU SLAVE, - typ interfejsu: RS485,
Wyjścia analogowe	- napięciowe: -10/10 V, - prądowe: -20/20 mA.
Funkcje dodatkowe	- tarowanie, - pomiar temperatury (PT100), - pomiar prądu płynącego przez mostek, - pomiar rezystancji, - automatyczna diagnostyka mostka (zwarcie, rozwarucie, zły typ czujnika), - wyjścia dwustanowe, - alarmy, - kompensacja rezystancji przewodów połączeniowych (do 150 m).

4. PROJEKT WZMACNIACZA

4.1. Schemat blokowy

Głównym elementem wzmacniacza tensometrycznego są trzy analogowe tory pomiarowe przedstawione na rysunku 3. Pierwszy tor służy do pomiaru napięcia wyjściowego mostka. W jego skład wchodzi układ zasilania tensometrów stabilizowanym napięciem DC o wartości 5 V lub 2,5 V (możliwym do wyboru z poziomu użytkownika). Do stabilizacji napięcia zasilającego wykorzystano pętlę sprzężenia zwrotnego „Sense”, która pozwala na kompensację rezystancji przewodów połączeniowych. Urządzenie wykorzystuje klasyczną konstrukcję toru pomiarowego, w której sygnał pomiarowy $\Delta U(t)$ jest kierowany do wzmacniacza różnicowego o regulowanym wzmacnieniu, następnie jest poddany filtracji i zamieniony na słowo cyfrowe za pomocą przetwornika AC.



Rys. 3. Schemat blokowy wzmacniacza tensometrycznego

Drugi tor służy do pomiaru prądu płynącego przez mostek tensometryczny, co pozwala na automatyczną diagnostykę toru pomiarowego, np. na identyfikację zwarcia, przerwy w obwodzie czy wykrycie czujników niewłaściwego typu. Ponadto znajomość wartości prądu płynącego przez mostek umożliwia pomiary zmian rezystancji czujników tensometrycznych w funkcji ugięcia belki.

Do zasilenia czujnika Pt100 wykorzystano źródło prądowe, którego zasadę działania oparto na układzie wtórnika napięcia. Układ ten utrzymuje stałe napięcie na boczniku, który jest włączony szeregowo z czujnikiem Pt100, przez co wymusza przepływ prądu o stałym natężeniu $I_{ref} = 2,4 \text{ mA}$. Przyjęta wartość natężenia prądu pozwala na ograniczenie efektu podgrzewania termometru, jednocześnie zapewniając wystarczająco duży spadek napięcia na jego zaciskach.

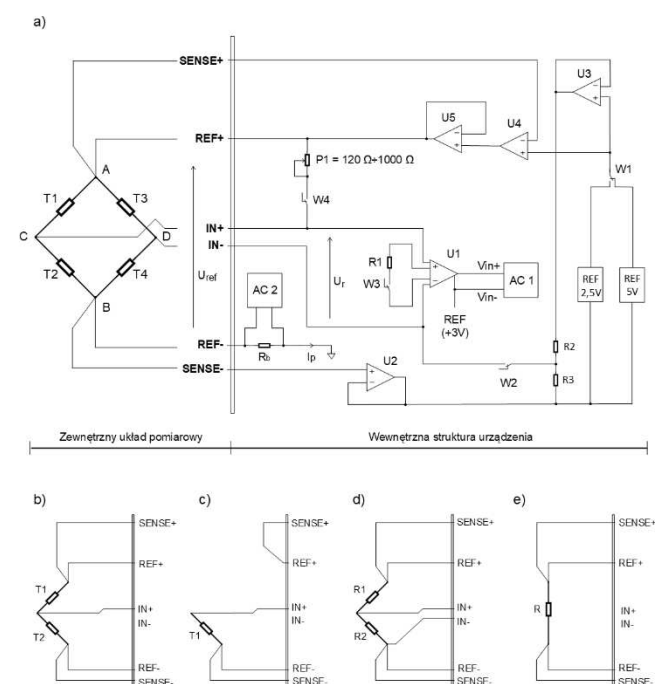
Część cyfrowa została zrealizowana z wykorzystaniem 8-bitowego mikrokontrolera ATmega32 firmy Microchip. Jest on odpowiedzialny za sterowanie wszystkimi układami analogowymi i cyfrowymi wzmacniacza tensometrycznego. Do realizacji funkcji dodatkowych służą moduły peryferyjne, odpowiedzialne za: prezentację wyników pomiarów (wyświetlacz graficzny typu OLED), komunikację (port szeregowy RS485) oraz sterowanie zewnętrznymi układami za pomocą tranzystorowych wyjść

dwustanowych. Aby umożliwić współpracę z urządzeniami analogowymi, układ został wyposażony w dwa wyjścia, jedno napięciowe -10/10 V oraz drugie prądowe -20/20 mA. Oba wyjścia są sterowane za pomocą sygnałów PWM. Sygnały te są poddane filtracji z wykorzystaniem filtrów o topologii Sallen – Key i odpowiednio wzmacnione.

Wzmacniacz został zasilony napięciem sieciowym z wykorzystaniem zewnętrznego zasilacza impulsowego o napięciu wyjściowym +13 V. Zasilanie dla części cyfrowej zapewnia przekształtnik impulsowy obniżający napięcie z 13 V do 5 V, natomiast do wytworzenia ujemnego napięcia -15 V, koniecznego dla układów analogowych wykorzystano monolityczny układ impulsowego inwertera napięcia. Dla zapewnienia zasilania o niskich poziomach szumów dla części analogowej, napięcia +13 V i -15 V poddano filtracji za pomocą dwóch stabilizatorów liniowych 7810 oraz 7910.

4.2. Tor pomiaru napięcia różnicowego i rezystancji

Szczegółową budowę wzmacniacza tensometrycznego pokazano na rysunku 4. Zasilanie zacisku dodatniego A mostka pomiarowego zrealizowano za pomocą precyzyjnych wzmacniaczy operacyjnych. Napięcia referencyjne REF 2.5 V oraz REF 5 V zostały dołączone za pomocą łącznika W1 do wzmacniaczy: U3 (zasilającego dzielnik napięcia), oraz U4 (zasilającego mostek pomiarowy). Aby zapewnić wymaganą wydajność prądową całego układu zastosowano dodatkowy wzmacniacz operacyjny OPA547 (element U5), który pełni rolę bufora prądowego. Użyty wzmacniacz OPA547 pozwala również na ograniczenie prądu zwarciovego, co zostało wykorzystane do zabezpieczenia układu zasilania mostka przed niewłaściwym podłączeniem przewodów REF+ oraz REF-. Cały układ zasilania objęto pętlą sprzężenia zwrotnego SENSE+, dzięki temu napięcie zasilające tor pomiarowy nie zależy od spadku napięcia na przewodach połączeniowych i niedokładności bufora U5.



Rys. 4. Schemat funkcjonalny toru pomiarowego mostka: a) pomiar napięcia w układzie pełnego mostka, b) pomiar napięcia w układzie pół mostka, c) pomiar napięcia w układzie ćwierć mostka, d) jednoczesny pomiar rezystancji dwóch tensometrów, e) pomiar rezystancji jednego tensometru.

Zacisk ujemny B mostka pomiarowego dołączono za pomocą bocznika Rb do masy urządzenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu umożliwiono pomiar prądu przepływającego przez układ z czujnikami. Potencjał występujący w punkcie B jest monitorowany za pomocą wzmacniacza U2 i dołączany do zacisku ujemnego napięć referencyjnych.

Pomiar napięcia przekątnej mostka odbywa się przy użyciu wzmacniacza różnicowego INA128 (układ U1) oraz przetwornika analogowo-cyfrowego MCP3421 (układ AC1). Wzmacniacz INA128 jest wzmacniaczem o niskim poziomie offsetu wynoszącym $50 \mu\text{V}$, dryfcie temperaturowym na poziomie $0,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ i wysoką wartością tłumienia napięcia wspólnego $\text{CMR} = 120 \text{ dB}$. Wzmocnienie układu może być regulowane za pomocą zewnętrznie dołączonej rezystancji. W projekcie skorzystano z tej możliwości, dołączając za pomocą łącznika W3 rezystancję R1. Dzięki temu umożliwiono regulację wzmocnienia pomiędzy dwoma wartościami 1 oraz 100. Aby zminimalizować wpływ rezystancji łącznika W3 na wartość wzmocnienia układu INA128, zastosowano przełącznik mechaniczny o pozłacanych stykach, który charakteryzuje się małą rezystancją styku.

Użyty przetwornik analogowo-cyfrowy MCP3421 jest kompletnym systemem pomiarowym, który zawiera w swojej strukturze wzmacniacz różnicowy o regulowanym wzmocnieniu, źródło napięcia odniesienia $2,048 \text{ V} \pm 0,05 \%$ ($5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) oraz 18-bitowy przetwornik AC typu $\Delta\Sigma$. Producent podaje, że wartości doprowadzonych napięć do zacisków pomiarowych Vin+ i Vin- (rys. 4) nie mogą przekroczyć zakresu od 0 V do 5 V względem masy układu. Aby zrealizować ten wymóg również dla ujemnych napięć pomiarowych do zacisku referencyjnego wzmacniacza INA128 i zacisku ujemnego Vin- przetwornika AC dołączono napięcie +3 V. Dzięki temu napięcie wyjściowe układu INA128 zostało odniesione do poziomu +3 V, co pozwoliło na uzyskanie przedziału mierzonych napięć od +1 V do +5 V względem masy układu.

Zastosowanie dwóch wzmacniaczy różnicowych (INA128 oraz wbudowany w MCP3421) pozwoliło na uzyskanie 8 zakresów pomiarowych: $\pm(2,5, 5, 10, 20, 250, 500, 1000, 2000) \text{ mV}$. Wybrany zakres otrzymuje się poprzez odpowiednią regulację wzmocnienia dwóch wzmacniaczy jednocześnie (1 lub 100 dla INA128 oraz 1, 2, 4, 8 dla MCP3421).

Aby umożliwić wykonanie pomiarów we wszystkich układach mostkowych do struktury toru pomiarowego dodano dzielnik rezystancyjny R2 – R3 (rys. 4a), który pełni rolę brakującej gałęzi ADB w układzie pół mostka oraz potencjometr precyzyjny P1 regulowany w zakresie od 120Ω do 1000Ω , pełniący rolę trzeciego tensometru w układzie ćwierć mostka. Rezystory te są dołączane za pomocą łączników W2 i W4 po ustawieniu odpowiedniego trybu pomiaru w menu.

Pomiar rezystancji tensometrów może być wykonany w dwóch trybach pokazanych na rysunku 4. Rezystancja tensometrów w układzie d) wyznaczana jest w kilku krokach procedury pomiarowej na podstawie wartości napięć U_r , U_{ref} i prądu I_p .

Wszystkie elementy zastosowane w torze pomiarowym musiały posiadać wystarczającą dokładność, dlatego zdecydowano się na zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych i źródeł napięć odniesienia dedykowanych do budowy precyzyjnej aparatury pomiarowej. W tabelicy 2 przedstawiono typy wybranych elementów wchodzących w skład toru pomiarowego.

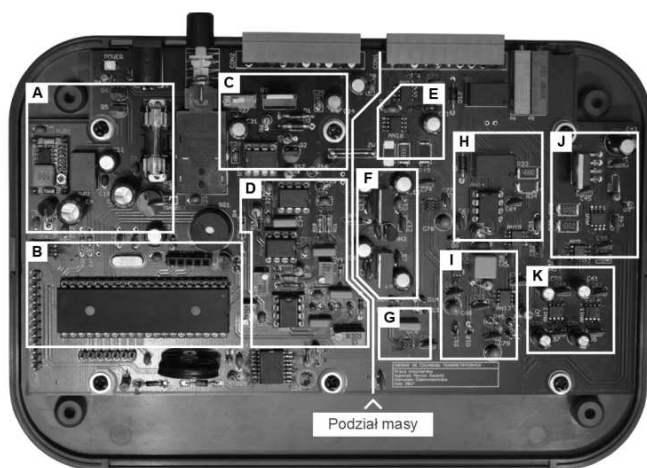
Tablica 2. Typy wybranych elementów wchodzących w skład toru pomiarowego

Element na schemacie	Typ	Element na schemacie	Typ
AC1, AC2	MCP3421	REF 5	ADR4550B
U2, U3, U4	OPA2277	U1	INA128
U5	OPA547	W1, W2	DG419
REF 2,5	ADR4525B	W3, W4	HFD23005

5. WYKONANIE

5.1. Płytki PCB

Płytkę zaprojektowano zgodnie z [6]. Podczas tworzenia projektu zwrócono szczególną uwagę na odseparowanie elementów części cyfrowej od analogowej i podział mas. Część cyfrową urządzenia wraz z układem zasilania i mikrokontrolerem zlokalizowano po lewej stronie płytki, natomiast wszystkie elementy związane z torem pomiarowym po jej prawej stronie. Na rysunku 5 przedstawiono płytkę PCB osadzoną w podstawie obudowy wraz z lokalizacją najważniejszych elementów wzmacniacza tensometrycznego.



Rys. 5. Płyta główna wzmacniacza i rozmieszczenie najważniejszych elementów funkcjonalnych: A) przetwornice impulsowe, B) mikrokontroler, C) wyjścia dwustanowe i komunikacja RS485, D) wyjścia analogowe, E) pomiar prądu, F) stabilizatory liniowe, G) pomiar temperatury, H) wzmacniacz INA128, I) filtr antyaliasingowy i przetwornik AC, J) wzmacniacze U3, U4 i bufor prądowy OPA547, K) źródła napięcia odniesienia REF 2,5 i REF 5.

5.2. Obudowa

Urządzenie zamknięto w obudowie z tworzywa sztucznego o wymiarach $200 \times 40 \times 135 \text{ mm}$. Na rysunku 6 przedstawiono wygląd wykonanego wzmacniacza tensometrycznego.

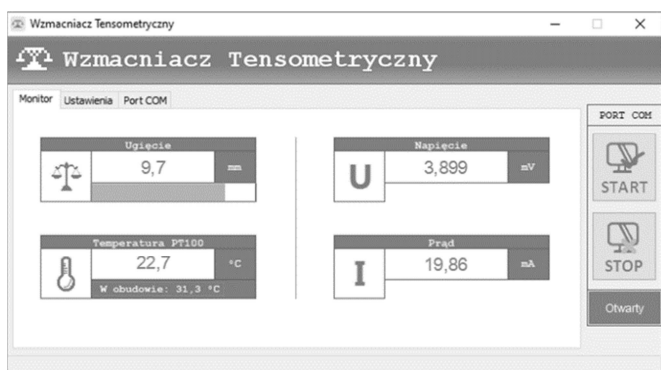


Rys. 6. Wygląd wzmacniacza tensometrycznego

Na przedniej stronie wzmacniacza zamieszczono cztery przyciski służące do nawigacji: strzałka w prawo, strzałka w lewo, enter, oraz powrót. Dodatkowo w górnej części płyty czołowej znajduje się pięć diod LED odpowiedzialnych za: sygnalizację stanu magistrali RS485, sygnalizację wykrycia stanu awaryjnego mostka pomiarowego, informację o załączonych alarmach oraz sygnalizację stanu zasilania urządzenia (włączony / czuwanie). Za wyświetlanie menu użytkownika i prezentację wyników pomiarów jest odpowiedzialny wyświetlacz graficzny typu OLED o rozdzielczości 16x100 pikseli.

5.3. Aplikacja

W ramach projektu powstała prosta aplikacja wykonana w środowisku Delphi Berlin. Pozwala ona na sterowanie pracą wzmacniacza z poziomu komputera PC. Aplikacja składa się z trzech zakładek. W zakładce „Monitor” (rys. 7) wyświetlane są wszystkie najważniejsze dane pomiarowe, takie jak: aktualne ugięcie belki, temperatura czujników tensometrycznych, napięcie w przekątnej mostka i prąd płynący w obwodzie pomiarowym. Druga zakładka o nazwie „Ustawienia” pozwala na sterowanie pracą urządzenia, np. wybór napięcia i zakresu pomiarowego, wybór rodzaju badanego układu (pełny mostek, pół mostek, ćwierć mostek), wybór rodzaju pomiaru (pomiar napięcia lub rezystancji), wybór trybu pomiaru (ciągły, na żądanie) oraz włączanie i wyłączenie alarmów. Ostatnia zakładka o nazwie „Port COM” służy do ustawień portu szeregowego, takich jak adres urządzenia, tryb i prędkość transmisji.



Rys. 7. Widok zakładki „Monitor”

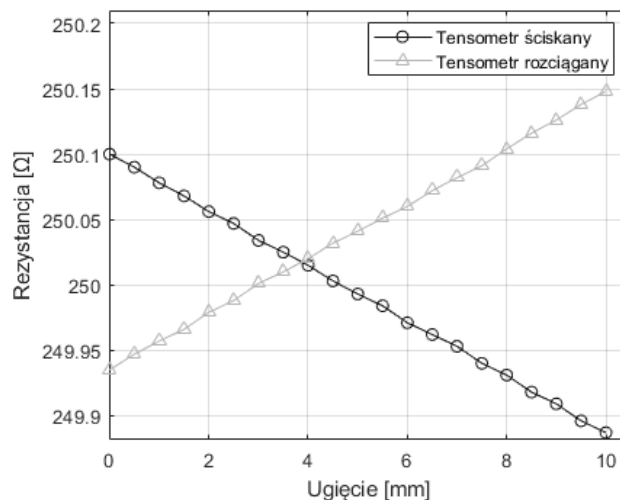
5.4. Wyniki testów systemu

Testy systemu wykonano w zakresie pomiarów rezystancji tensometrów, napięć wyjściowych układów mostkowych, prądu przepływającego w układzie mostkowym oraz temperatury otoczenia.

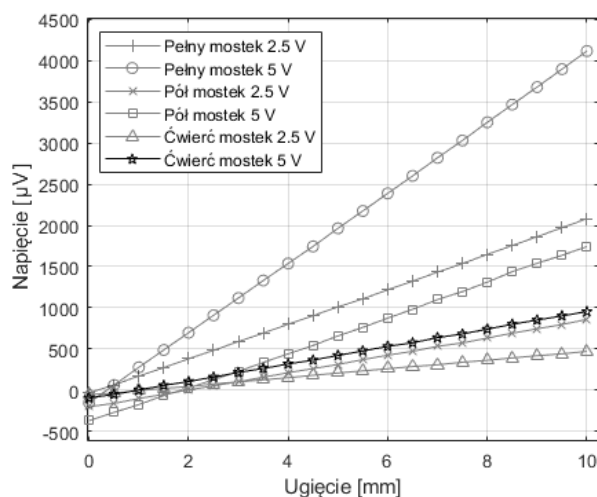
Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki zmian rezystancji tensometrów w funkcji ugięcia belki dla jednego z tensometrów naklejonych na górnej części belki (rozciąganego) i jednego z tensometrów naklejonych pod belką (ściskanego). Badania wykazały, że rezystancja obu tensometrów zmieniła się o 0,213 Ω dla całego zakresu ugięcia belki. Uzyskane charakterystyki pozwalają na zaobserwowanie właściwości tensometrów oraz wyznaczenie stałej K – zgodnie z zależnością (2).

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiarów napięć wyjściowych układów mostkowych uzyskane w układach przedstawionych na rysunkach 4a, 4b oraz 4c. Pomiar przeprowadzono dla dwóch wartości napięć

zasilających: 2,5 V oraz 5 V, a wszystkie wyniki rejestrowano z rozdzielczością 1 μ V. Uzyskane charakterystyki pozwalają na zaobserwowanie właściwości układów mostkowych i wyznaczenie ich wybranych parametrów, np. czułość, nieliniowość.



Rys. 8. Charakterystyki zmian rezystancji tensometrów w funkcji ugięcia belki



Rys. 9. Charakterystyki zmian napięcia wyjściowego mostka w funkcji ugięcia belki

Oceny dokładności zaprojektowanego wzmacniacza tensometrycznego dokonano przez wyznaczenie błędów granicznych pomiarów z wykorzystaniem średniej klasy multimetru laboratoryjnego typu Agilent 34401A. Do obliczeń przyjęto parametry multimetru podane dla okresu 1 roku od daty kalibracji przyrządu [7].

Wyniki pomiarów rezystancji uzyskane za pomocą wykonanego urządzenia pokrywały się ze wskazaniami multimetru Agilent 34401A uzyskanymi na zakresie 1,000000 k Ω . Przyjęto zatem, że maksymalny błąd bezwzględny pomiaru rezystancji zaprojektowanego wzmacniacza tensometrycznego wynosi ± 11 m Ω .

W przypadku pomiarów napięcia badania wykazały, że dla zakresów: 2,5 mV, 5 mV, 10 mV, 20 mV wskazania obu przyrządów pokrywały się. Przyjęto zatem, że maksymalny błąd bezwzględny pomiaru napięcia na tych zakresach nie przekracza maksymalnego błędu multimetru, który mieści się w przedziale $\pm 8,5$ μ V. Dla pozostałych

zakresów wskazania obu przyrządów różniły się maksymalnie o: 700 μV dla zakresu 2000 mV, 459 μV dla zakresu 1000 mV, 553 μV dla zakresu 500 mV oraz 612 μV dla zakresu 250 mV. Uwzględniając uzyskane wartości błędów bezwzględnych oraz graniczne wartości błędów pomiaru napięcia stałego multimetrem Agilent 34401A na zakresie 1 V ($\pm 47 \mu\text{V}$) i na zakresie 10 V ($\pm 4 \mu\text{V}$) wyznaczono graniczne wartości błędów względnych wzmacniacza tensometrycznego dla wszystkich zakresów pomiarowych (2,5, 5, 10, 20, 250, 500, 1000, 2000) mV – w odniesieniu do zakresu pomiarowego, które wynoszą odpowiednio: \pm (0,34, 0,17, 0,08, 0,04, 0,26, 0,12, 0,05, 0,04) %.

Dokładność pomiaru prądu oszacowano wykorzystując rezystor dekadowy, który włączono szeregowo z multimetrem Agilent 34401A pomiędzy zaciski REF+ oraz REF- (rys. 4a), co pozwoliło na zmiany prądu w torze pomiarowym. Pomiar wykazały, że dla prądów w zakresie od 15 mA do 23 mA wskazania multimetru i wykonanego urządzenia całkowicie się pokrywały, natomiast dla całego zakresu pomiarowego, wynoszącego od 0 mA do 45 mA, zanotowano największą różnicę wskazań na poziomie 5 μA . Uwzględniając, że błąd graniczny pomiaru prądu o wartości 45 mA, multimetrem Agilent 34401A, wynosi $\pm 22,5 \mu\text{A}$ i różnica wskazań obu przyrządów wynosi 5 μA , oszacowano wartość graniczną błędu bezwzględnego, która wynosi $\pm 27,5 \mu\text{A}$, co w odniesieniu do zakresu pomiarowego prądu daje wartość względną $\pm 0,06$ %.

Wykonano testy systemu w zakresie jego obsługi przez użytkownika zdalnego. Do tego celu wykorzystano, stosowane do zdalnego nauczania na Uniwersytecie Zielonogórskim, narzędzia firmy Google, do których należy m.in. pulpit zdalny Chrome. Dla systemu pomiarowego zostało utworzone dedykowane konto w domenie @g.elearn.uz.zgora.pl. Użytkownik zdalny po zalogowaniu się na dedykowane konto, uruchomieniu aplikacji pulpit zdalny, wybraniu dedykowanego komputera i wprowadzeniu kodu PIN uzyskał pełny dostęp do komputera PC sterującego pracą systemu, tym samym mógł uruchomić aplikację sterującą pracą systemu. Do komputera dołączona była kamera, która pozwoliła użytkownikowi zdalnemu na obserwację pracy wzmacniacza. W celu umożliwienia użytkownikowi zdalnemu sterowania stanowiskiem dydaktycznym w pełnym zakresie (sterowaniem ugięciem płaskownika) wymagana jest rozbudowa systemu o układ sterowania silnikiem i rozbudowa aplikacji programowej.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję systemu pomiarowego przystosowanego do współpracy ze stanowiskiem dydaktycznym służącym do badania tensometrów i układów mostkowych. Wykonany wzmacniacz tensometryczny, który stanowi główny element systemu pozwala na badanie czujników pracujących we wszystkich konfiguracjach mostkowych. Dodatkowo urządzenie pozwala na wykonanie pomiarów rezystancji oraz współpracuje z czujnikiem Pt100, co umożliwia badanie wpływu temperatury na właściwości tensometrów.

Wykonane testy urządzenia wykazały, że dokładność pomiarów jest na poziomie zbliżonym do dokładności średniej klasy aparatury pomiarowej, co wystarcza do realizacji ćwiczeń dydaktycznych. Konstrukcja wzmacniacza umożliwia budowę systemów pomiarowych, w których zachodzi konieczność pomiaru napięcia, natężenia prądu, rezystancji lub temperatury, dzięki temu może znaleźć zastosowanie w laboratoriach dydaktycznych

Zaprojektowana, do sterowania pracą wzmacniacza, aplikacja programowa pozwala na jego pełną obsługę, co w połączeniu z narzędziami informatycznymi pozwalającymi na dostęp do komputerów przez użytkownika zdalnego pozwala na realizację ćwiczenia dydaktycznego w trybie zdalnym.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Miłek M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Oficyna wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006.
2. Szablowski S.: Wirtualne laboratorium w dydaktyce mechatroniki, Dydaktyka Informatyki 5, 107-126.
3. Galwas B., Piwowarska E., Godziemba-Maliszewski M.: Laboratorium wirtualne w dydaktyce i badaniach naukowych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.
4. Gawędzki W.: Pomiar elektrycznych wielkości nieelektrycznych, AGH, Kraków, 2010.
5. Kowalski S., Mielniczuk J., Paszkowicz M.: Mechanika techniczna, Oficyna wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 1998.
6. Jones David L.: PCB Design Tutorial: <https://alternatezone.com/electronics/files/PCBDesignTutorialRevA.pdf>.
7. Agilent 34401A 6 1/2 Multimeter User's Guide, 2007.

DIDACTIC MEASUREMENT SYSTEM FOR COOPERATION WITH STRAIN GAUGE SENSORS

The paper presents an extended structure and construction of a measurement system for cooperation with the training stand located in the laboratory of the Institute of Electrical Metrology, Electronics and Computer Science, of the University of Zielona Góra. The measurement system allows testing of strain gauges and bridge systems. The system consists of three independent components: the training stand, an advanced strain gauges amplifier and a server. The training stand allows to determine the sensors characteristics as a function of a metal bar deflection and allows to study the influence of the temperature on the work of the strain gauges. The advanced strain gauges amplifier is a multifunctional device, capable of measuring differential voltage, resistance, current and temperature. The precision operational amplifiers and reference voltage sources used during the construction of the instrumentation amplifier allowed to obtain the accuracy of the measurement at a level close to the average class of measuring equipment. The modular structure of the system enables the construction of various measurement systems, where it is necessary to measure voltage, current, resistance or temperature.

Keywords: strain gauges amplifier, bridge measurement systems, strain gauge measurement.