OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Piotr SITEK[1], Łukasz WALAS[2], Aleksander LISOWIEC[3], Paweł MICHALSKI[4], Mariusz KUCHAREK[5], Sławomir KRAWCZYK[6]

ORCID: [1]0009-0009-4893-4236, [2]0000-0001-8976-7504, [3]0000-0002-4488-179X, [4]0000-0002-3176-5562, [5]0000-0002-5492-3666, [6]0000-0002-7077-1279

DOI: 10.15199/48.2025.11.33

Sprzętowa architektura urządzenia NILM do identyfikacji podłączonych odbiorników elektrycznych oraz analizy zużycia energii

Hardware architecture of the NILM device for identifying connected electrical loads and analyzing energy consumption

[1] mgr. inż. Piotr Sitek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: piotr.sitek@itr.lukasiewicz.gov.pl
[2] mgr. inż. Łukasz Walas, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: lukasz.walas@itr.lukasiewicz.gov.pl
[3] dr inż. Aleksander Lisowiec, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: aleksander.lisowiec@itr.lukasiewicz.gov.pl
[4] mgr. inż. Paweł Michalski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: pawel.michalski@itr.lukasiewicz.gov.pl
[5] mgr. inż. Mariusz Kucharek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl
[6] dr inż. Sławomir Krawczyk, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: slawomir.krawczyk@itr.lukasiewicz.gov.pl

Adres do korespondencji: piotr.sitek@itr.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Urządzenie NILM (Non-Intrusive Load Monitoring) umożliwia identyfikację podłączonych odbiorników elektrycznych oraz analizę ich zużycia energii z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Kluczowym elementem systemu jest jego część sprzętowa, odpowiedzialna za akwizycję danych pomiarowych dotyczących sygnałów elektrycznych. Sygnał prądowy jest mierzony za pomocą cewki Rogowskiego, a napięciowy – za pomocą dzielnika napięcia. Układ przetwarzania sygnałów składa się z modułów kondycjonujących, które zapewniają odpowiednią jakość danych wejściowych do analizy. Dzięki temu możliwa jest skuteczna ekstrakcja cech charakterystycznych dla poszczególnych odbiorników, co stanowi podstawę dalszego przetwarzania za pomocą algorytmów uczenia maszynowego. Urządzenie wykorzystuje bezprzewodową transmisję danych na serwer za pomocą sieci LTE, co umożliwia zdalne monitorowanie i akwizycję danych.

Słowa kluczowe: NILM (Nieinwazyjne monitorowanie obciążenia), Cewka Rogowskiego, identyfikacja odbiorników, pomiar mocy

Abstract: The NILM (Non-Intrusive Load Monitoring) device enables identification of connected electrical receivers and analysis of their energy consumption using machine learning. The key element of the system is its hardware part, responsible for the acquisition of measurement data regarding electrical signals. The current signal is measured using a Rogowski coil, and the voltage signal - by a voltage divider. The signal processing system consists of conditioning modules, which ensure the appropriate quality of input data for analysis. This allows for effective extraction of characteristic features for individual devices, which is the basis for further processing using machine learning algorithms. The device uses wireless data transmission to the server using the LTE network, which allows remote monitoring and data acquisition.

Keywords: NILM (Non-Intrusive Load Monitoring), Rogowski Coil, receiver identification, power measurement

Wstęp

Metoda NILM (Non-Intrusive Load Monitoring, pol. Nieinwazyjne monitorowanie obciążenia) umożliwia identyfikację poszczególnych odbiorników energii elektrycznej na podstawie analizy sygnałów napięcia i prądu mierzonych w jednym punkcie instalacji elektrycznej [1]. takie Analiza kształtu przebiegu, widma częstotliwościowego czy charakterystyki mocy w czasie pozwala na rozróżnienie urządzeń bez potrzeby stosowania dedykowanych sensorów (podłączanych

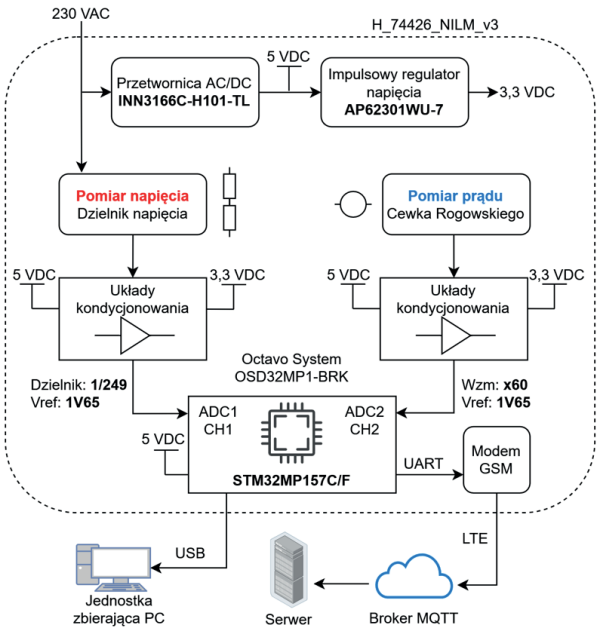
idywidualnie do każdego urządzenia), co czyni rozwiązanie nieinwazyjnym i ekonomicznym. Identyfikacja aktywnych urządzeń oraz ocena ich indywidualnego zużycia energii elektrycznej może posłużyć do stworzenia rekomendacji dotyczących jej racjonalnego wykorzystania w przedsiębiorstwach i zakładach przemysłowych. Niniejszy artykuł koncentruje się na części sprzętowej systemu NILM. Przedstawiono w nim architekturę urządzenia brzegowego przeznaczonego do akwizycji danych pomiarowych, uwzględniając: tory pomiarowe, układy kondycjonowania sygnału, zasilania oraz komunikacji bezprzewodowej.

Ogólny opis części sprzętowej systemu

Rysunek 1 przedstawia schemat blokowy układu akwizycji danych systemu NILM. Podstawą układu jest obwód drukowany, wykonany w Łukasiewicz-ITR. Układ jest zasilany bezpośrednio z sieci elektrycznej o napięciu 230 VAC. Przekształcenie napięcia sieciowego na poziom 5 VDC realizowane jest za pomocą przetwornicy AC/DC INN3166C-H101-TL. Uzyskane napięcie 5 VDC zasila zarówno moduł Octavo Systems ODS32MP1-BRK, modem GSM, jak i wzmacniacze operacyjne OPA810IDBVT użyte w torach kondycjonowania sygnału. Dodatkowo, impulsowy stabilizator napięcia AP62301WU-7 generuje napięcie 3,3 VDC, wykorzystywane m.in. w układzie ograniczenia górnego poziomu napięcia sygnału pomiarowego doprowadzanego do przetwornika analogowo-cyfrowego modułu Octavo. Ograniczenie to realizowane jest z użyciem diody Schottky'ego, której charakterystyka przewodzenia umożliwia skuteczną ochronę wejścia ADC przed przekroczeniem dopuszczalnego zakresu napięć przetwornika. Zebrane dane pomiarowe są przesyłane z modułu Octavo Systems do modemu SIMCOM S2-109ZZ za pośrednictwem interfejsu UART. Następnie, z wykorzystaniem łączności LTE, dane te są transmitowane do zdalnego serwera z użyciem protokołu komunikacyjnego MQTT. System umożliwia również lokalny odczyt danych pomiarowych poprzez bezpośrednie połączenie z modułem Octavo Systems ODS32MP1-BRK za pośrednictwem interfejsu USB. Rozwiązanie to pozwala na przesyłanie danych do komputera PC bez konieczności korzystania z transmisji bezprzewodowej, co było przydatne na etapie testowania

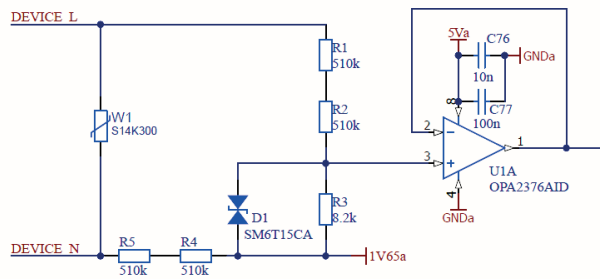
Pomiar napięcia

Na wejście toru kondycjonowania układu pomiaru napięcia doprowadzane jest napięcie sieciowe



Rys. 1. Schemat blokowy systemu NILM

230 VAC, pełniące rolę sygnału pomiarowego. Jednocześnie napięcie to zasila zarówno obwód pomiarowy modułu NILM, jak i podłączone urządzenia odbiorcze. W celu dopasowania poziomu sygnału 230 VAC do zakresu 0-3,3 V przetwornika analogowo-cyfrowego [2], napięcie to zostaje zredukowane za pomocą dzielnika napięcia. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [3] przewiduje odchylenia napięcia sieciowego +/-10%. W skonstruowanym urządzeniu przyjęto większy zakres zmian napięcia sieci wynoszący +/-20%. Napięcie 230 VAC + 20% zakresu zmian przekłada się na sygnał o amplitudzie 390 V.

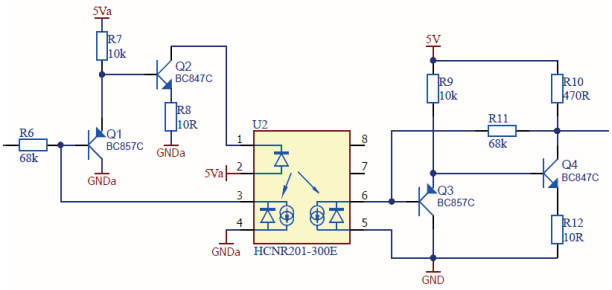


Rys. 2. Stopień wejściowy układu kondycjonowania pomiaru napięcia

Dla przyjętych wartości rezystorów R_1–R_5 (Rysunek 2), całkowite tłumienie sygnału wejściowego wynosi około 249 razy, co odpowiada obniżeniu amplitudy napięcia z 390 V do poziomu około 1,56 V według wzoru (1):

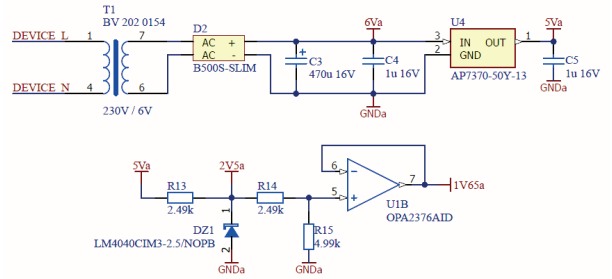
$$(1)\ V_{out} = \frac{R_3}{(R_1 + R_2 + R_4 + R_5) + R_3} V_{in} = \frac{8{,}2k\Omega}{2048{,}2k\Omega} 390V \approx 1{,}56V$$

Taki dobór rezystorów zapewnia, że sygnał pomiarowy, nawet w warunkach podwyższonego napięcia sieciowego mieści się w pełni w dopuszczalnym zakresie przetwornika analogowo-cyfrowego (0-3,3 V), gwarantując jednocześnie maksymalne wykorzystanie jego przestrzeni dynamicznej bez ryzyka nasycenia lub obcięcia sygnału. Sygnał wyjściowy z dzielnika napięcia posiada offset 1,65 V, co odpowiada połowie zakresu pracy przetwornika analogowo-cyfrowego zastosowanego w module Octavo Systems.



Rys. 3. Układ z transoptorem HCNR201-300E do przenoszenia sygnału z dzielnika napięcia do obwodu z przetwornikiem ADC

W celu zapewnienia izolacji galwanicznej pomiędzy częścią układu odpowiedzialną za pomiar napięcia sieciowego, a pozostałą częścią systemu NILM, zastosowano precyzyjny transoptor analogowy z fotodiodą HCNR201-300E [4], który przenosi sygnał z dzielnika napięcia do obwodu z przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Schemat opisanego układu jest pokazany na Rysunku 3.



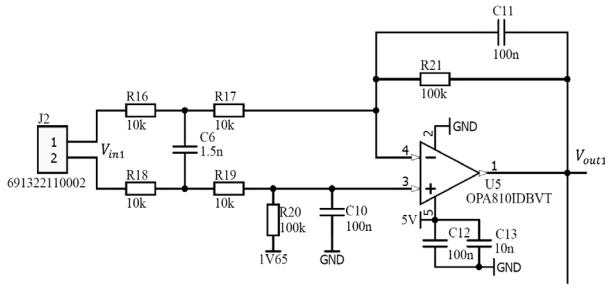
Rys. 4. Układ generowania offsetu 1,65 V do dzielnika napięcia

Generowanie napięcia offsetu 1,65 V dodawanego do sygnału z dzielnika napięcia odbywa się w osobnym torze zasilania względem obwodu z przetwornikiem analogowo-cyfrowym (Rysunek 4). Układ bazuje na transformatorze 230VAC/6VAC, którego napięcie na wyjściu poddawane jest prostowaniu za pomocą mostka B500S-SLIM, a następnie stabilizowane do poziomu 5 VDC za pomocą liniowego stabilizatora napięcia AP7370-50Y-13. Źródło odniesienia LM4040CIM3-2.5/NOPB generuje napięcie 2,5 V, które za pomocą dzielnika rezystorowego, jest redukowane do poziomu 1,65 V. Uzyskane napięcie offsetu jest wykorzystywane w torze pomiarowym jako poziom odniesienia sygnału napięcia sieciowego.

Pomiar prądu

Cewka Rogowskiego, produkcji Łukasiewicz-ITR, zastosowana w systemie do pomiaru prądu, charakteryzuje się czułością 1mV/1A, co oznacza, że dla zakładanego maksymalnego prądu 18 A RMS sygnał na jej wyjściu osiąga wartość 18 mV RMS. Zakładając czysty sinusoidalny przebieg, aby obliczyć wartość szczytową V_{in1}, skorzystano ze wzoru (2).

$$V_{in1} = 18mV \times \sqrt{2} \approx 25{,}46mV \tag{2}$$



Rys. 5. Stopień wejściowy układu kondycjonowania sygnału z cewki Rogowskiego

Rysunek 5 przedstawia stopień wejściowy układu kondycjonowania sygnału z cewki Rogowskiego, wykorzystywany w torze pomiaru prądu. Sygnał generowany przez cewkę cechuje się niską amplitudą oraz brakiem odniesienia do potencjału masy, dlatego wymaga odpowiedniego wzmocnienia oraz konwersji do postaci różnicowej kompatybilnej z przetwornikiem analogowo-cyfrowym na płytce Octavo System OSD32MP1-BRK. W pierwszym etapie sygnał z cewki V_{in1} jest wzmacniany za pomocą wzmacniacza różnicowego, co pozwala na stłumienie składowych wspólnych oraz wstępne wzmocnienie poziomu sygnału do użytecznego zakresu. Za pomocą równań Kirchhoffa obliczono, że napięcie na wyjściu układu V_{out1} z Rys. 5. wynosi 38,95 mV (3), przy założeniu maksymalnego napięcia przemiennego (50 Hz) o amplitudzie 25,46 mV dla zmierzonego prądu 18 A RMS

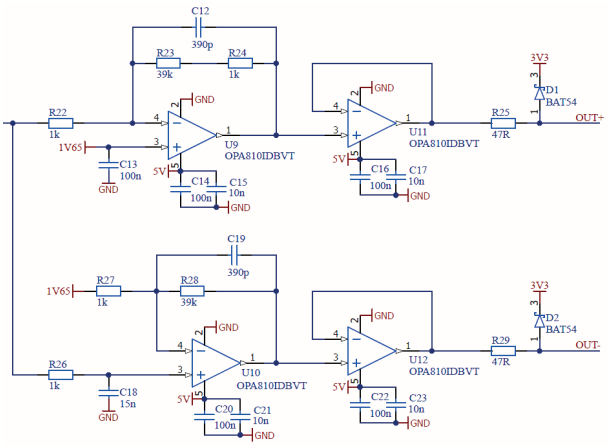
$$V_{out1} = -\frac{V_{in1}Z_{21}}{2C_6R_{16}R_{17}ss + R_{16} + R_{17}} = -38{,}95mV \tag{3}$$

Wzmocnienie układu z rysunku 5 wyraża się w postaci operatorowej za pomocą wzoru (3), gdzie dla wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej należy podstawić $ss = j2\pi f$. Wyznaczenie tej charakterystyki

pozwoliło określić wzmocnienie układu z rysunku 5 dla sygnału o częstotliwości 50 Hz jak równe -1,53, wzór (4):

$$k_1 = \frac{V_{out1}}{V_{in1}} = -\frac{38{,}95mV}{25{,}46mV} = -1{,}53 \tag{4}$$

Następnie, w celu uzyskania pełnej postaci różnicowej sygnału zgodnej z wejściem ADC, tor kondycjonowania sygnału z cewki Rogowskiego został rozdzielony na dwa niezależne kanały. W jednym z nich zastosowano wzmacniacz odwracający, a w drugim wzmacniacz nieodwracający (Rysunek 6).



Rys. 6. Dalsza część układu kondycjonowania sygnału z cewki Rogowskiego

Celem zastosowania tych dwóch wzmacniaczy jest wygenerowanie pary sygnałów różnicowych względem wspólnego punktu odniesienia (offsetu = 1,65 V), z przeciwnymi biegunowościami, przy zachowaniu symetrii wzmocnienia. Częstotliwość próbkowania sygnałów analogowych została ustalona na poziomie 20 kHz. Zgodnie z twierdzeniem Nyquista–Shannona, prawidłowa rekonstrukcja sygnału analogowego wymaga, aby jego maksymalna częstotliwość była co najmniej dwukrotnie mniejsza od częstotliwości próbkowania. W związku z tym, w celu ograniczenia składowych wyższych rzędów i uniknięcia aliasingu, w torze kondycjonowania zastosowano dodatkowy filtr dolnoprzepustowy. Dobór wartości elementów filtru, w szczególności kondensatora C12, pozwolił na uzyskanie częstotliwości granicznej filtru na poziomie 10,2 kHz, co odpowiada połowie częstotliwości próbkowania. W przypadku toru ze wzmacniaczem odwracającym z rysunku 6, wzmocnienie napięcia zmiennego k_2 dla 50 Hz wynika ze wzoru (5) [5,6].

$$k_2 = \frac{V_{out2}}{V_{out1}} = -\frac{R_{23}+R_{24}}{R_{22}} \times \frac{1}{1+2\pi f C_{12}(R_{23}+R_{24})} \approx -38{,}81 \tag{5}$$

Wzmocnienie dla toru ze wzmacniaczem w układzie nieodwracającym k_3 wynosi 40, co wynika ze wzoru (6) [5,6]. Dodatkowo w układzie zastosowano kondensator 390 pF tworząc filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej ~10,5 kHz.

$$k_3 = \frac{V_{out3}}{V_{out1}} = 1 + \frac{R_{28}}{R_{27}} = 1 + \frac{39k\Omega}{1k\Omega} = 40 \tag{6}$$

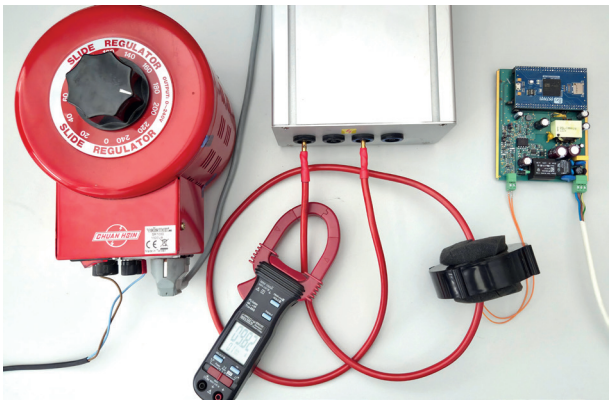
Wzmocnione sygnały z obu torów kondycjonowania są następnie doprowadzane do wtórnika napięciowego w celu zapewnienia niskiej impedancji wyjściowej. Zastosowanie wtórnika eliminuje ryzyko wpływu obciążenia wejścia ADC na charakterystyki toru pomiarowego, a także poprawia stabilność sygnału na wejściu przetwornika. Przetwornik ADC pracuje w zakresie napięć od 0 V do 3,3 V. W celu zabezpieczenia wejścia ADC przed przekroczeniem tego dopuszczalnego zakresu napięć w sytuacji awaryjnej, zastosowano diodę Schottky'ego typu BAT54, umieszczoną bezpośrednio przed wejściem ADC. Dioda zastosowana w układzie zabezpiecza znajdujące się dalej wrażliwe układy przetwornika ADC przed zakłóceniami pochodzącymi z obwodu pomiarowego lub tymi które pochodzą od zakłóceń elektromagnetycznych. Zastosowanie diody Schottky'ego, dzięki jej charakterystyce pracy, gwarantuje natychmiastowe ograniczenie napięcia wchodzącego na wejście przetwornika ADC przez bocznikowanie prądu do potencjału zasilania układu. Całkowite wzmocnienie toru kondycjonowania sygnału prądowego wynika z iloczynu wzmocnienia pierwszego stopnia, oznaczonego jako k_1, oraz jednego z dwóch równoległych torów wzmacniających: toru odwracającego k_2 lub nieodwracającego k_3. W analizowanym przypadku łączna wartość wzmocnienia wynosi około 59,38, a maksymalne napięcie wyjściowe 1,52 V, zgodnie ze wzorem (7):

$$V_{out} = k_1 k_2 \times V_{in1} = 59{,}38 \times 25{,}46mV \approx 1{,}52V \tag{7}$$

Przy założeniu offsetu sygnału wynoszącego 1,65 V, odpowiadającego połowie zakresu przetwornika analogowo-cyfrowego (0–3,3 V), otrzymany sygnał wyjściowy dla maksymalnego prądu 18 A RMS mieści się w całości w dopuszczalnym zakresie napięciowym ADC. Jednocześnie w pełni wykorzystuje jego przestrzeń dynamiczną, co przekłada się na optymalną rozdzielczość pomiaru oraz minimalizację błędów kwantyzacji.

Testy układu w warunkach laboratoryjnych

Weryfikacja działania układu kondycjonowania toru prądowego została wykonana z wykorzystaniem pomiaru sygnału prądowego za pomocą cewki



Rys. 7. Układ do testowania pomiaru prądu przez moduł NILM

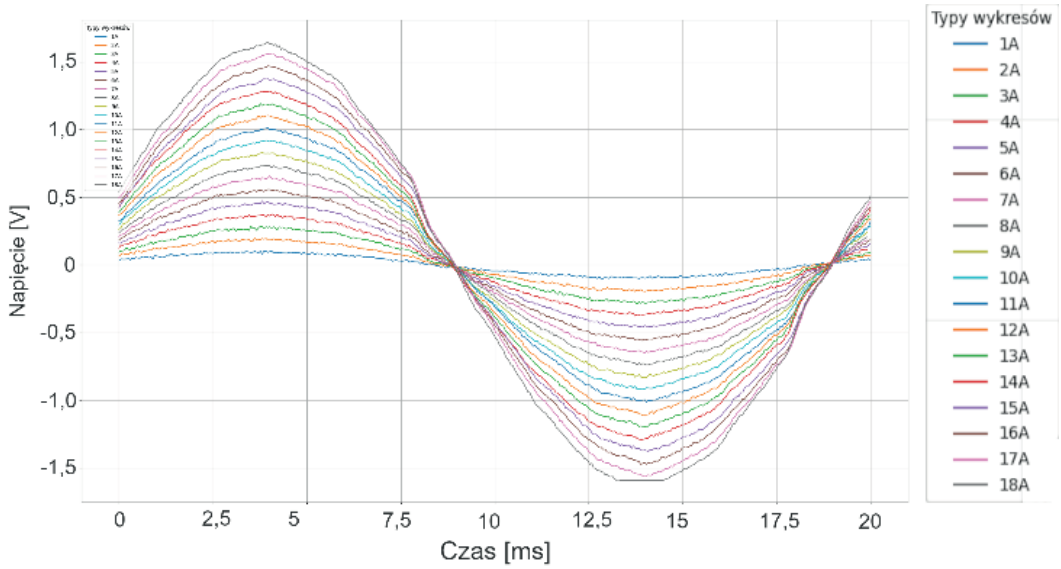
Rogowskiego przy kontrolowanym przepływie prądu przemiennego w obwodzie pierwotnym cewki.

Układ testowy (Rysunek 7) wykorzystuje autotransformator Chuan Hsin SRV-10 oraz przekładnik prądowy Emtest MC 2630, w którym umieszczono przewód zasilający. Wartość mierzonego prądu zmieniano w zakresie od 1 A do 18 A (ze skokiem co 1 A), kontrolując jednocześnie jego wartość za pomocą miernika cęgowego. Sygnał wyjściowy cewki Rogowskiego był dołączony do modułu NILM, opisywanego wcześniej.

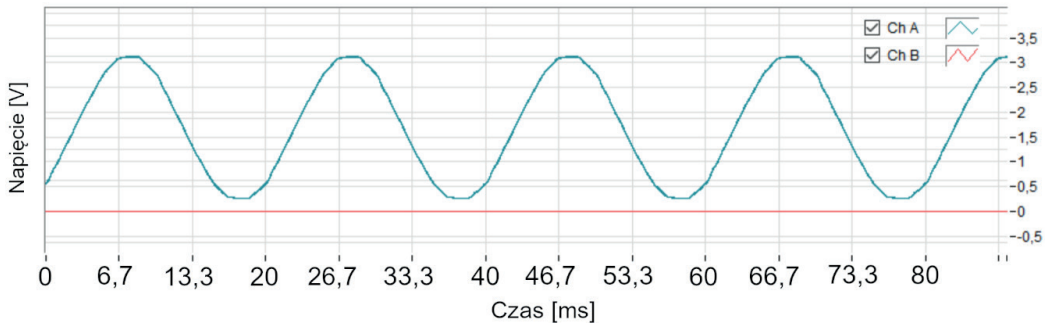
Zarejestrowane przebiegi (Rysunek 8) wykazują wysoką liniowość układu pomiarowego. Amplituda sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do wartości prądu wejściowego.

Rysunek 9 przedstawia zarejestrowany przebieg napięcia sieci zasilającej po przejściu przez tor kondycjonowania. Wartość napięcia została zweryfikowana za pomocą multimetru cyfrowego, który wskazał wartość skuteczną 239 VAC. Zastosowanie offsetu 1,65 V umożliwiło reprezentację przebiegu zmiennego w pełnym zakresie przetwornika (0–3,3 V), co widoczne jest w postaci przesunięcia sygnału względem osi zerowej. Amplituda zarejestrowanego sygnału mieści się w bezpiecznym przedziale napięciowym przetwornika, a sinusoidalny kształt przebiegu świadczy o poprawnym działaniu toru kondycjonowania oraz braku istotnych zniekształceń sygnału

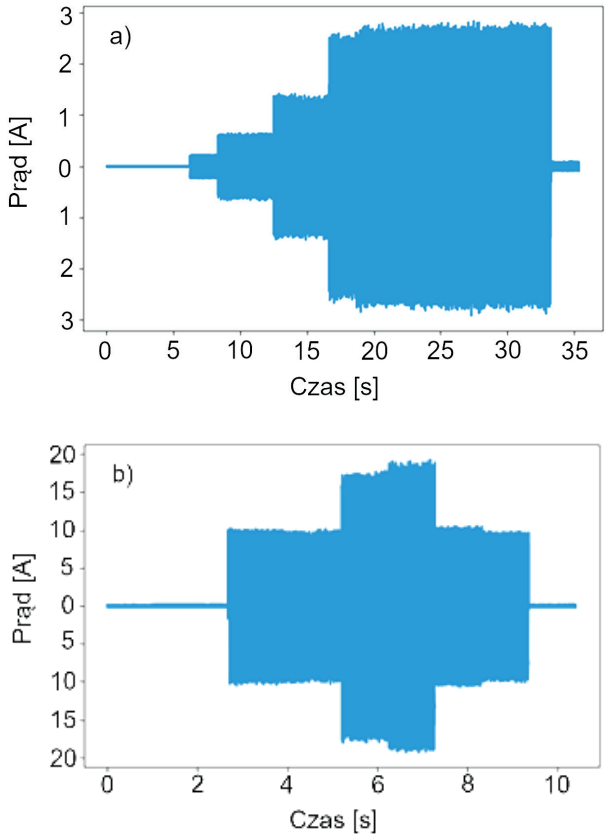
W ramach testów przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych rejestrowano przebiegi prądowe odpowiadające pracy różnych odbiorników energii elektrycznej. Rysunek 10 przedstawia przykładowe wyniki pomiarów. Na pierwszym wykresie zobrazowano zmiany prądu wynikające z sekwencyjnego załączania trzech lamp oświetleniowych oraz oscyloskopu. Drugi



Rys. 8. Przebieg jednego okresu prądu o wartościach 1-18 A RMS



Rys. 9. Przebieg napięcia sieciowego zasilającego odbiorniki



Rys. 10. Wykresy zmiany prądu podczas włączania wybranych odbiorników: a) 3 lampy i oscyloskop b) 2 czajniki

wykres przedstawia przebieg prądu podczas kolejnego włączania i wyłączania dwóch czajników elektrycznych. Zaobserwowane wartości skuteczne prądu były zgodne z parametrami znamionowymi umieszczonymi na etykietach producenta poszczególnych urządzeń.

Planowane testy w warunkach rzeczywistych

W celu weryfikacji poprawności działania zaprojektowanego systemu NILM w warunkach rzeczywistych, planuje się przeprowadzenie testów funkcjonalnych w środowisku produkcyjnym. Urządzenie zostanie zainstalowane w rozdzielnicy niskiego napięcia, zlokalizowanej w jednym z pomieszczeń zakładu zajmującego się produkcją obwodów drukowanych. Pomieszczenie będzie wyposażone w odbiorniki energii o różnym poborze mocy. System NILM zostanie podłączony do toru zasilania głównego, co pozwoli na rejestrację próbek sygnałów napięciowych i prądowych w jednym punkcie pomiarowym. Na ich podstawie możliwe będzie wyznaczenie istotnych cech sygnału, takich jak wartości skuteczne, zawartość harmonicznych oraz impedancje dla wybranych składowych częstotliwościowych. Informacje te posłużą w dalszej fazie projektu do budowy wektora cech znaczących, który będzie wykorzystywany w algorytmach klasyfikacji opartych na metodach sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, w celu identyfikacji aktywnych odbiorników energii elektrycznej.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono projekt oraz weryfikację działania warstwy sprzętowej systemu NILM przeznaczonego do monitorowania zużycia energii elektrycznej w instalacjach niskiego napięcia. Opracowane rozwiązanie umożliwia nieinwazyjną identyfikację aktywnych odbiorników na podstawie analizy sygnałów napięcia i prądu mierzonych w jednym punkcie sieci. Zebrane dane pomiarowe posłużą do ekstrakcji istotnych cech sygnału, które następnie będą wykorzystywane w algorytmach sztucznej inteligencji do identyfikacji aktywnych odbiorników energii elektrycznej. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły prawidłowe działanie torów pomiarowych. Układ kondycjonowania prądu oparty na cewce Rogowskiego wykazał wysoką liniowość w całym zakresie pomiarowym (1–18 A), z maksymalnym wykorzystaniem zakresu przetwornika ADC. W przypadku toru napięciowego, uzyskano sygnał dopasowany do zakresu przetwornika 0–3,3 V, z uwzględnieniem odchyłek napięcia sieciowego na poziomie ±20%.

Przyjęto: 10.11.2025, **zaakceptowano:** 12.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] J. Kelly, W. Knottenbelt, Neural NILM: Deep Neural Networks Applied to Energy Disaggregation, ACM BuildSys, Listopad 2015
[2] Dokumentacja techniczna OSD32MP1-BRK, Octavo System, Kwiecień 2020
[3] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2023 r., poz. 819)
[4] Dokumentacja techniczna HCNR201-300E – AV02-0886EN, Broadcom, Lipiec 2023
[5] Bruce Carter, Ron Mancini, Wzmacniacze operacyjne – teoria i praktyka, Wydawnictwo BTC, 2011
[6] Piotr Górecki, Wzmacniacze operacyjne: podstawy, aplikacje, zastosowania, Wydawnictwo Helion, 2004