



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**  
**WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI**  
**INSTYTUT ELEKTRONIKI**

**PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA**

**System analizy jakości energii elektrycznej w mieszkaniu**

*System for analyzing the quality of electricity in the apartment*

Autor: **Michał Woźniak**

Kierunek studiów: Elektronika i Telekomunikacja

Opiekun pracy: dr inż. Jacek Stępień

Kraków, 2023



# Spis treści

Wstęp .....	2
Cel pracy .....	3
1. Zagadnienia teoretyczne .....	4
1.1. Jakość energii elektrycznej oraz jej parametry .....	4
1.2. Zagadnienia matematyczne .....	11
2. Budowa interfejsu .....	15
2.1. Elementy fizyczne .....	15
2.2. Platformy sterujące .....	19
3. Budowa środowiska .....	21
3.1. Konfiguracja interfejsów .....	21
3.2. Konfiguracja środowiska .....	23
4. Aplikacja użytkownika .....	29
4.1. Implementacja praktyczna .....	29
4.2. Wizualizacja wyników .....	33
Podsumowanie .....	39
Bibliografia .....	40

## Wstęp

W dzisiejszych czasach, postęp techniczny znacząco przyczynił się do zwiększenia komfortu życia codziennego człowieka. Na każdym kroku spotykamy urządzenia elektroniczne, maszyny i sprzęty zaprojektowane z myślą o użytkowniku. Przeciętnie, każdy z nas posiada w domu kilkadziesiąt urządzeń tego typu. Począwszy od urządzeń RTV umilających czas takich jak telewizory, kina domowe, telefony, po sprzęt AGD pralki, zmywarki, lodówki, kuchenki i inne artykuły gospodarstwa domowego, bez których ciężko byłoby dzisiaj funkcjonować. Wszystkie te urządzenia zasilane są z sieci energetycznej, która dostarcza do odbiorców energię elektryczną, o określonych parametrach jakościowych, wynikających z Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [1]. Podstawę obowiązujących regulacji prawnych definiujących parametry, które powinna spełniać dostarczana sieć elektryczna w normalnych warunkach pracy, definiuje norma PN-EN 50160. Określa ona również sposób obróbki danych pomiarowych, jak i miejsce przeprowadzania badań [2].

Na jakość energii elektrycznej mają wpływ dostawcy oraz odbiorcy energii. Dostawcy dzięki sieciom elektroenergetycznym o odpowiedniej wydajności w zakresie obciążenia i niezmiennym parametrom napięcia zasilającego, odpowiadają głównie za dostarczane napięcie zasilające, a odbiorcy wpływają na jego przebieg poprzez użytkowane nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej, które mogą pogarszać jej jakość [3]. Urządzenia takie jak falowniki, zasilacze awaryjne UPS (ang. Uninterruptible Power Supply) ale również często spotykane układy zasilające i stabilizujące źródła światła, telewizory oraz komputery stacjonarne, są urządzeniami generującymi wyższe harmoniczne, które mogą spowodować nieporządne działanie innych urządzeń, lub doprowadzić nawet do ich awarii.

## Cel pracy

**W niniejszej pracy podjęto próbę zaprojektowania i wykonania systemu umożliwiającego użytkownikowi wgląd, od strony przyłącza klienta, w parametry sieci energetycznej niskiego napięcia oraz analizę wpływu sieciowych urządzeń elektrycznych, podłączonych do sieci w mieszkaniu, na przebieg natężenia prądu. Zakres pracy obejmuje zaprojektowanie i wykonanie interfejsu pomiędzy siecią energetyczną, a modulem oscyloskopu cyfrowego oraz budowę systemu umożliwiającego akwizycję sygnału energetycznego, wizualizację jego przebiegu czasowego, widma częstotliwościowego oraz pomiar podstawowych parametrów energii elektrycznej.**

Zaprojektowany system analizy jakości energii elektrycznej ma za zadanie z wyprzedzeniem ostrzec użytkownika, o niespełnianiu przez użytkowaną sieć energetyczną obowiązujących norm, aby uniknąć negatywnych skutków jej działania, takich jak awarie urządzeń spowodowane przerwami w zasilaniu, zapadami lub przepięciami, oraz przyspieszenie degradacji urządzeń jako skutek oddziaływania prądu i napięcia odkształconego przez odbiorniki nieliniowe. Niepożądanym skutkiem jest także zwiększenie wartości skutecznej prądu, co może spowodować zwiększenie strat energii w elementach przemysłowych takich jak kable, a to z kolei może doprowadzić do przegrzania przewodu, stopienia ochronnej osłony, a w skrajnych przypadkach doprowadzić do pożaru.

Praca składa się z czterech rozdziałów, które opisują stopniowy proces powstawania systemu.

Pierwszy rozdział poświęcony jest szeroko pojętej teorii z zakresów systemów energetycznych, opisując parametry jakościowe sieci, oraz sposoby ich pomiaru i pozyskiwania.

W kolejnym rozdziale opisany został etap projektowania oraz budowy platformy na której zmontowany został system, wraz z opisem doboru elementów oraz platform obliczeniowych.

Trzeci rozdział zawiera informacje dotyczące środowiska uruchomieniowego, wraz z omówieniem wykorzystanych technologii oraz napisanych skryptów i programów sterujących.

Ostatni rozdział poświęcony jest przedstawieniu implementacji praktycznej oraz wizualizacji wyników.

# 1. Zagadnienia teoretyczne

## 1.1. Jakość energii elektrycznej oraz jej parametry

Jakość energii elektrycznej zdefiniowana została jako zbiór parametrów, które opisują proces dostarczania energii do użytkownika, w normalnych warunkach pracy. Według obowiązującej normy PN-EN 50160:2010, normalne warunki pracy definiowane są jako „Warunki pracy sieci elektroenergetycznej, w której zapotrzebowanie jest pokryte przez moc wytwarzaną, wykonywane są operacje łączeniowe, a uszkodzenia są eliminowane przez automatyczny system automatyki zabezpieczeniowej, przy równoczesnym braku nadzwyczajnych warunków”. Tak więc dostawca energii nie odpowiada za jakość dostarczanej energii w razie gdy sieć pracuje w tymczasowym układzie zasilania, lub gdy odbiorca nie zapewnia urządzeń bądź instalacji zgodnych z odpowiednimi normami lub wymogami technicznymi, które powinny respektować przyłącza odbiorców. Poza normalnymi warunkami pracy określa się także sytuacje wyjątkowe, takie jak klęski żywiołowe, działania władz publicznych, akcje protestacyjne, czy też zakłócenia spowodowane przez osoby trzecie. Zdefiniowane regulacje prawne wspomniane we wstępie, precyzują wyłącznie wymagania parametrów napięcia w punkcie granicznym: dostawca - klient, oraz warunki jakie musi spełnić odbiorca, aby dostawca mógł zapewnić wymaganą jakość energii.

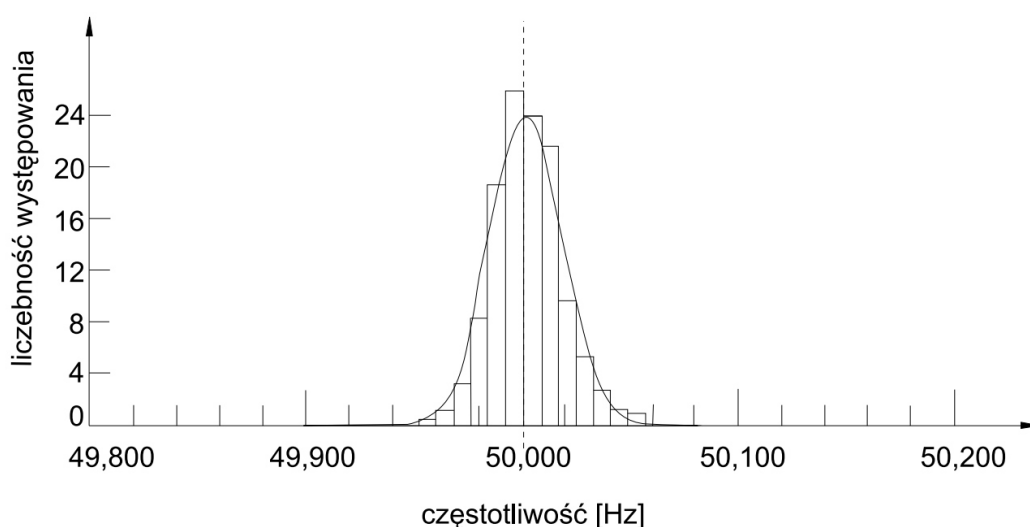
Jak wspomniano wcześniej na jakość energii elektrycznej mają wpływ dostawcy oraz odbiorcy energii. Dostawcy gwarantują odpowiednią jakość dostarczanego napięcia zasilającego, natomiast odbiorcy zwykle mają znaczący wpływ na jakość prądu, zmieniając jego przebieg poprzez wykorzystywane nieliniowe odbiorniki elektryczne [3]. Przyjęto że punktem wykonywania pomiaru jakości energii elektrycznej jest zwykle przyłącze, w miejscu gdzie jest ona dostarczana do odbiorcy ale priorytetem jest jakość energii na zaciskach użytkowanych odbiorników. Z czasem pojawia się coraz więcej odbiorników lub instalacji bardzo wrażliwych na zniekształcenia sygnałów elektrycznych, jednocześnie coraz więcej takich, które generują takie zakłócenia. Bagatelizowanie takich przypadków, lub nieświadomość ich występowania przy projektowaniu pojedynczych instalacji i obiektów grozi często kosztownymi komplikacjami podczas użytkowania urządzeń.

Częstotliwość znamionowa napięcia w sieci elektroenergetycznej wynosi w Europie 50Hz, a w większości krajów Ameryki Północnej oraz Ameryki Środkowej 60Hz. Parametr ten może ulegać niepożądanym zmianom.

**Odchylenie częstotliwości** w sieci definiowane jest jako różnica realnie zmierzonej chwilowej wartości częstotliwości i wartości znamionowej, która zachodzi w wyniku wolno zachodzących zmian częstotliwości.

Tymczasem **wahanie częstotliwości** to różnica powstała w wyniku szybko zachodzących zmian, która definiowana jest przez pochodną częstotliwości w funkcji czasu.

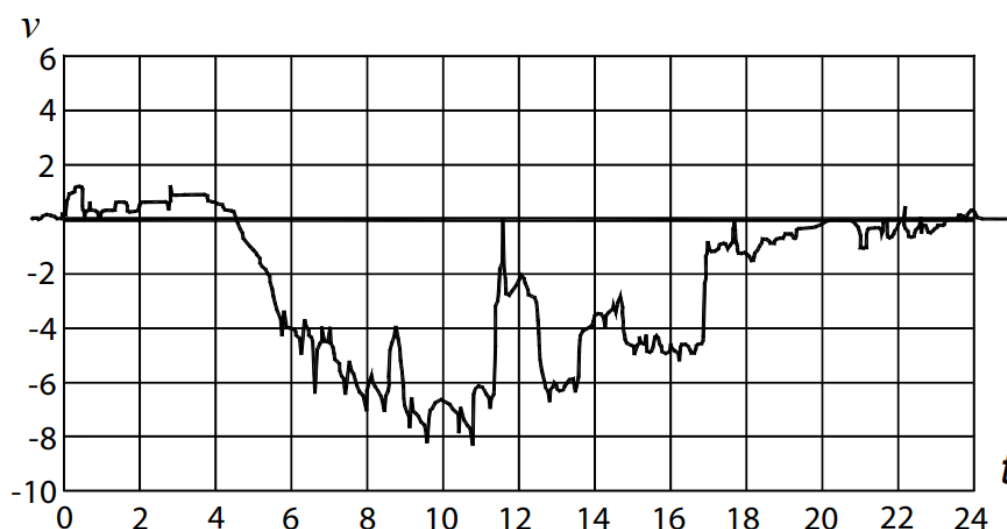
Odchylenia oraz wahania częstotliwości w systemie energetycznym wynikają z trwałego bądź przejściowego zaburzenia bilansu mocy czynnej [4]. Po połączeniu w roku 1996 polskiego systemu elektroenergetycznego z systemem zachodnioeuropejskim UCPTE (ang. Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity), zauważalne są mniejsze wartości odchyłeń i wahań częstotliwości. Norma PN-EN 50160 mówi, że „dla normalnych warunków pracy, wartość średnia częstotliwości, mierzonej przez 10 s dla sieci pracujących synchronicznie z systemem elektroenergetycznym powinna być zawarta w przedziale  $50\text{ Hz} \pm 1\%$  przez 95% roku, oraz  $50\text{ Hz} +4\% / - 6\%$  przez 100% czasu” [2].



**Rys. 1 Miesięczny histogram częstotliwości w systemie UCPTE grudzień 1994 r. [4]**

W Europie i większości krajów świata lokalna sieć elektroenergetyczna niskiego napięcia, dostarcza 230V wartości skutecznej RMS (ang. Root Mean Square – średnia kwadratowa) napięcia przemiennego znamionowego. Odchylenia napięcia to względna różnica bieżącej wartości skutecznej, oraz napięcia znamionowego, wywołana przez powolne zmiany poziomu napięcia, które powodowane są zmiennym obciążeniem poszczególnych elementów toru zasilania. Powolne zmiany napięcia to takie, które zachodzą nie szybciej niż 2% napięcia znamionowego na sekundę. Odbiorniki energii, zasilane napięciem, w którym występują

odchylenia generują straty, w związku z czym w dużych zakładach produkcyjnych, priorytetem jest zniwelowanie odchyleń napięcia w okresach aktywnego funkcjonowania zakładu. Norma PN-EN 50160 definiuje: „dla sieci niskiego napięcia, uśrednione wartości skuteczne napięcia zmierzone w losowo wybranych przedziałach o długości 10 minut powinny mieścić się w przedziale  $\pm 10\%$  wartości napięcia znamionowego 230 V, przez 95% tygodnia” [2].

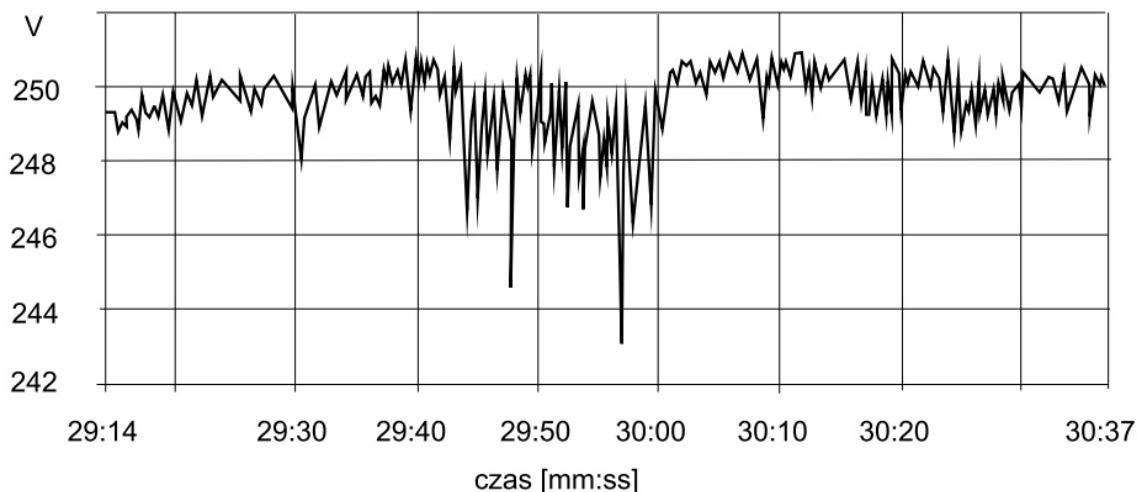


**Rys. 2 Przykładowy dobowy przebieg odchyleń wartości skutecznej napięcia z przedziałów 1-minutowych w instalacji roboczej [4]**

Wahania napięcia to powtarzające się zmiany napięcia, zachodzące szybciej niż 2% wartości napięcia znamionowego na sekundę, o zmianie amplitudy nie większej niż 10%, w stosunku do wartości poprzedzającej. Za wahania napięcia w sieci odpowiedzialne są odbiorniki pobierające zmienny, co do wartości skutecznej, prąd elektryczny, nazywane także odbiornikami niespokojnymi, definiowanymi jako: „urządzenia o zmiennym obciążeniu, których moc znamionowa jest znaczna w odniesieniu do mocy zwarciowej w punkcie ich przyłączenia do sieci zasilającej” [3]. Jako przykłady można wymienić bojler, urządzenia klimatyzacyjne, spawarki, piece łukowe, elektryczne piły, młoty czy maszyny wyciągowe. Najłatwiej obserwowalnym skutkiem wahań napięcia jest migotanie światła żarówek zasilanych z sieci energetycznej. Odczuwalny próg dokuczliwości zależy od amplitudy i częstotliwości wahań napięcia. Aby ograniczyć wahania napięcia, do odbiorników niespokojnych należy stosować transformatory o zwiększonej mocy jednostkowej, zasilać je z węzłów sieci elektroenergetycznej charakteryzujących się dużą mocą zwarciową, bądź zastosować transformatory z uzwojeniami dzielonymi do osobnego zasilania odbiorników wrażliwych oraz



niespokojnych. Norma PN-EN 50160 definiuje dla sieci niskiego napięcia, wymagany zakres szybkich zmian napięcia do 5% wartości znamionowej.

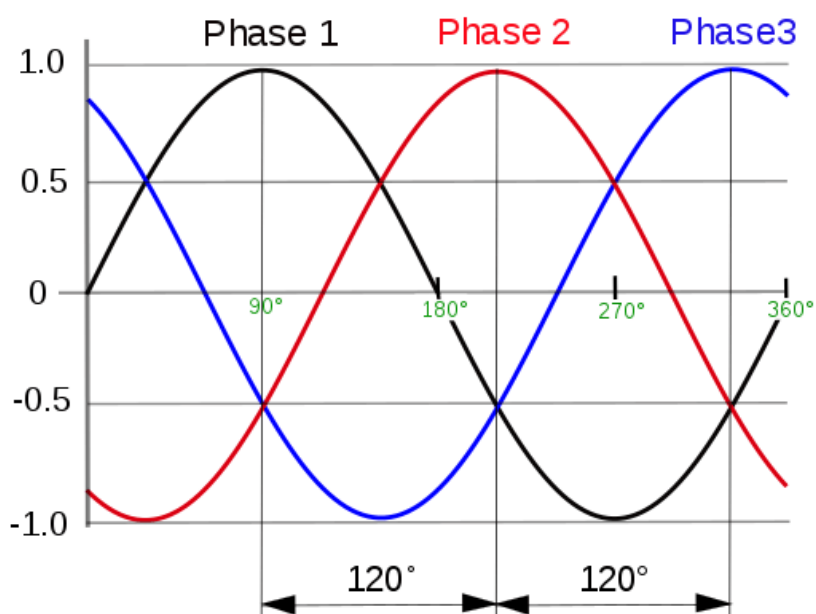


**Rys. 3 Zobrazowanie wahan napięcia w instalacji niskonapięciowej [4]**

Zapad napięcia występuje gdy jego wartość skuteczna nagle maleje do wartości w zakresie od 1% do 90% wartości znamieniowej. Zazwyczaj czas trwania tego zjawiska mieści się pomiędzy 10ms, a 1min. Może ono negatywnie wpływać na działanie sprzętu elektronicznego, układów sterowania, komputerów czy urządzeń oświetleniowych. Zapady powstają przy zwarcjach przemijających, przy zadziałaniu odgromników, oraz przy wyłączaniu zwarć w instalacjach i sieciach elektrycznych.

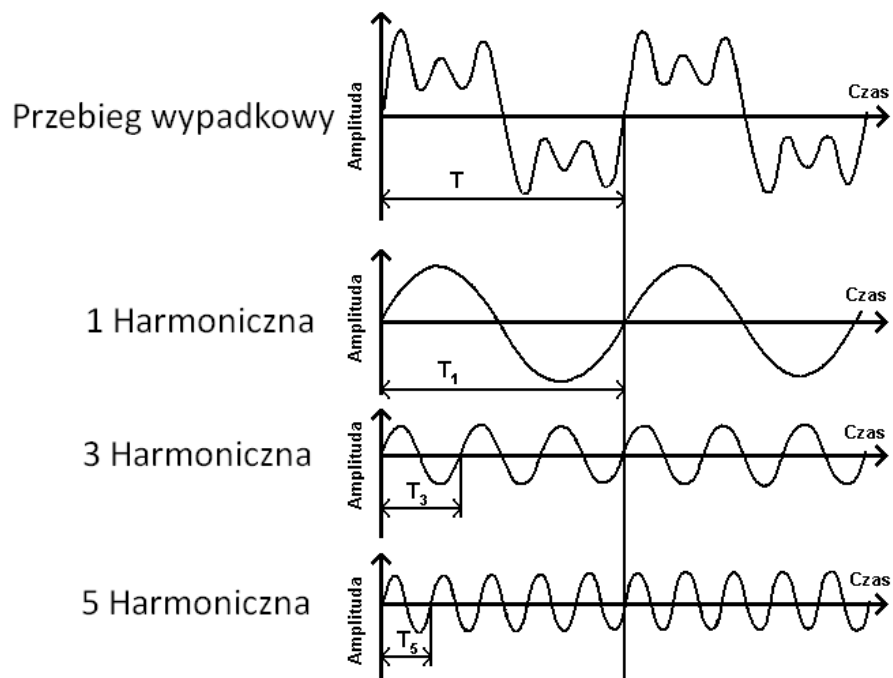
Gdy napięcie w miejscu przyłączenia do sieci spada poniżej 1%, mówimy o przerwie w zasilaniu. Norma PN-EN 50160:2002 definiuje największy dopuszczalny łączny roczny czas trwania przerwy w zasilaniu sieci niskiego napięcia na poziomie 48 godzin.

Asymetria napięcia, to stan wynikający z nierównych wartości amplitud napięć fazowych, lub z nierównych sobie kątów między kolejnymi napięciami fazowymi. Generatorami tego typu zniekształceń mogą być odbiorniki trójfazowe o asymetrycznym obciążeniu chwilowym, takie jak piece łukowe, nierównomiernie rozmieszczone odbiorniki jednofazowe włączone między przewody fazowe i neutralny, lub zespoły odbiorników jednofazowych przyłączonych do linii trójfazowej, takie jak piece indukcyjne lub spawarki transformatorowe. Za miarę niesymetrii napięcia przyjmuje się stosunek względnej zawartości składowej symetrycznej przeciwnej do składowej zgodnej. Norma PN-EN 50160 stawia wymagania by stosunek ten był mniejszy, bądź równy 0,02. Za właściwe przesunięcie fazowe uważa się kąt  $120^{\circ} \pm 1,5^{\circ}$ .



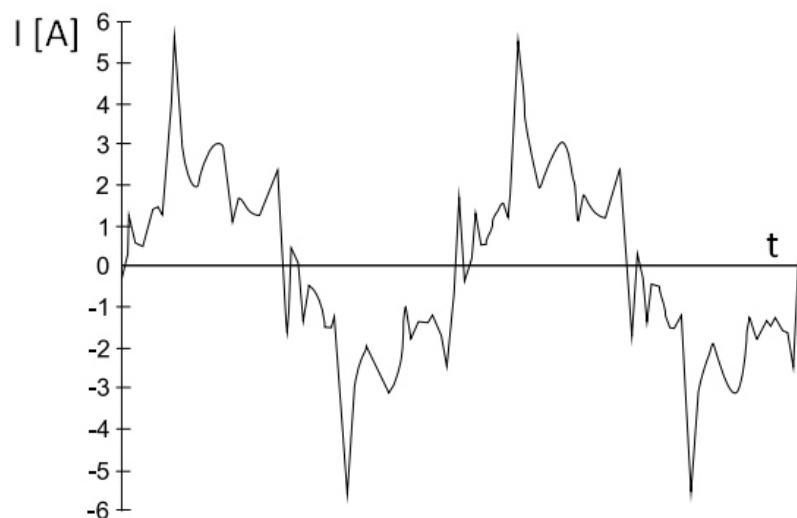
**Rys. 4** Zobrazowanie 3 faz napięcia przesuniętych o  $120^\circ$  [5]

Wyższe harmoniczne to przebiegi sinusoidalne o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej (pierwszej harmonicznej). W przypadku częstotliwości znamionowej z gniazdka sieciowego czyli 50Hz, harmonicznej 2, 3 i 4 będzie odpowiadał sygnał o częstotliwości 100, 150 i 200 Hz. Badanie jakości energii elektrycznej wymaga uwzględniania częstotliwości aż do 40 harmonicznej, czyli do składowej sygnału o częstotliwości 2000Hz. Przykładowy rozkład na składowe harmoniczne przebiegu będącego sumą trzech sygnałów sinusoidalnych zobrazowano na rysunku 5.



**Rys. 5 Sygnał złożony z 3 składowych harmoniczných**

Za wprowadzanie odkształceń harmoniczných napięcia odpowiedzialne są odbiorniki nieliniowe, które pobierają prąd niesinusoidalny (odkształcony). Do takich urządzeń możemy zaliczyć odbiorniki wykorzystujące wyładowanie elektryczne w gazie, takie jak spawarki i piece łukowe, lampy wyładowcze, urządzenia zasilane poprzez przekształtniki, urządzenia zawierające magnetowody ulegające nasyceniu, oraz urządzenia powszechnego użytku zawierające zasilacze transformatorowe, lub zasilacze impulsowe [3].



**Rys. 6 Przebieg sygnału prądowego (40 ms) pobieranego przez oprawę z lampą metalohalogenkową i kondensatorem do kompensacji równoległej [4]**

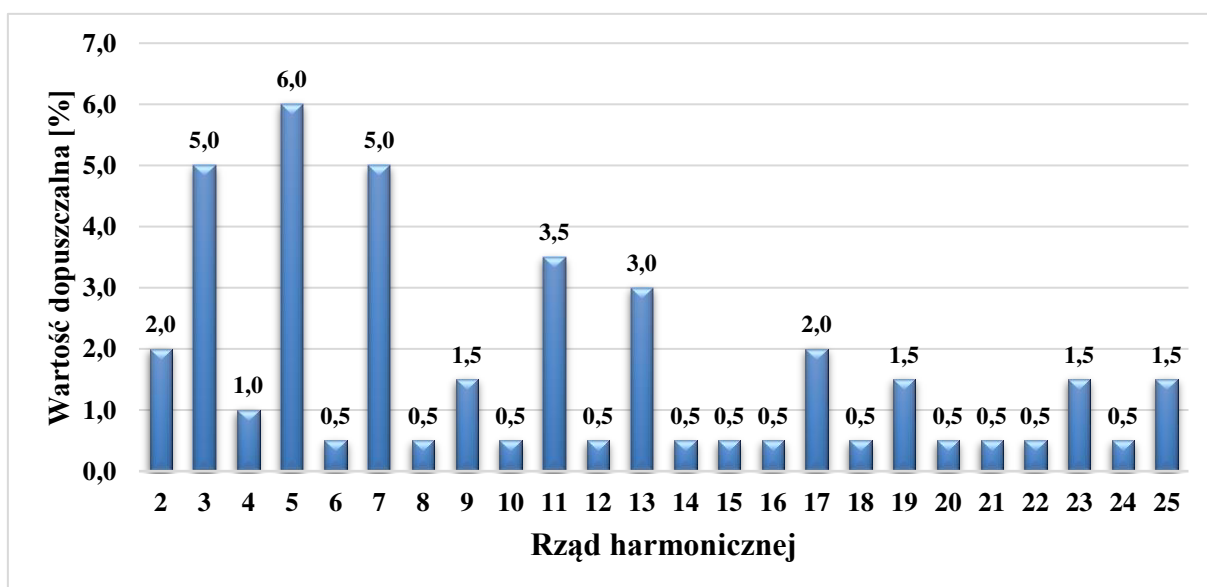
Odształcenie napięcia w praktyce jest ukazywane poprzez wartość parametru całkowitego współczynnika odształcenia THD (ang. Total Harmonic Distortion Factor). Określa on procentowy stosunek wartości skutecznej wyższych harmoniczných do wartości skutecznej harmoniczných podstawowej.

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} * 100 \%$$

gdzie:

- $U_h$  – Wartość skuteczna napięcia  $n$  – tej harmoniczných
- $U_1$  – Wartość skuteczna napięcia dla pierwszej harmoniczných
- $n$  – rząd harmoniczných

Aktualnie obowiązujące przepisy zdefiniowane przez normę PN-EN 50160:2008 oraz Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, definiują maksymalną wartość THD w sieciach o napięciu znamionowym poniżej 110kV na 8% [1]. Dopuszczalne wartości procentowe poszczególných harmoniczných w stosunku do pierwszej harmoniczných, do 25 rzędu, w sieciach niskiego napięcia ukazane są na rysunku 7.



**Rys. 7 Wartości dopuszczalne poszczególných harmoniczných napięcia**

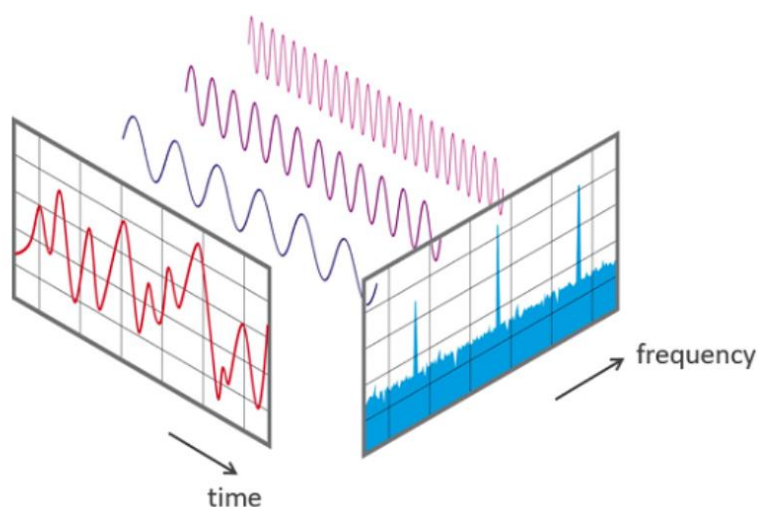
## 1.2. Zagadnienia matematyczne

Transformata Fouriera jest metodą umożliwiającą rozkład funkcji, najczęściej w dziedzinie czasu lub położenia, na jej składowe harmoniczne. Matematycznie jest definiowana jako „operator liniowy określany na pewnych przestrzeniach funkcyjnych, elementami których mogą być funkcje n zmiennych rzeczywistych. Opisuje ona rozkład tych funkcji w bazie ortonormalnej funkcji trygonometrycznych za pomocą iloczynu skalarnego funkcji” [6]. Zastosowanie transformaty Fouriera do analizy przebiegu czasowego sygnału pod kątem zawartości składowych częstotliwościowych, polega na przetworzeniu funkcji opisanej w dziedzinie czasu na funkcję opisaną w dziedzinie częstotliwości. Wzór opisujący transformację z dziedziny czasu  $t$  w dziedzinę pulsacji  $\omega$  (częstości kołowej) został przedstawiony poniżej:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

gdzie:

- $X(\omega)$  – widmo dla ciągłego sygnału analogowego  $x(t)$
- $x(t)$  – funkcja sygnału w dziedzinie czasu
- $\omega$  – pulsacja proporcjonalna do częstotliwości oscylacji
- $j$  – jednostka urojona
- $t$  - czas

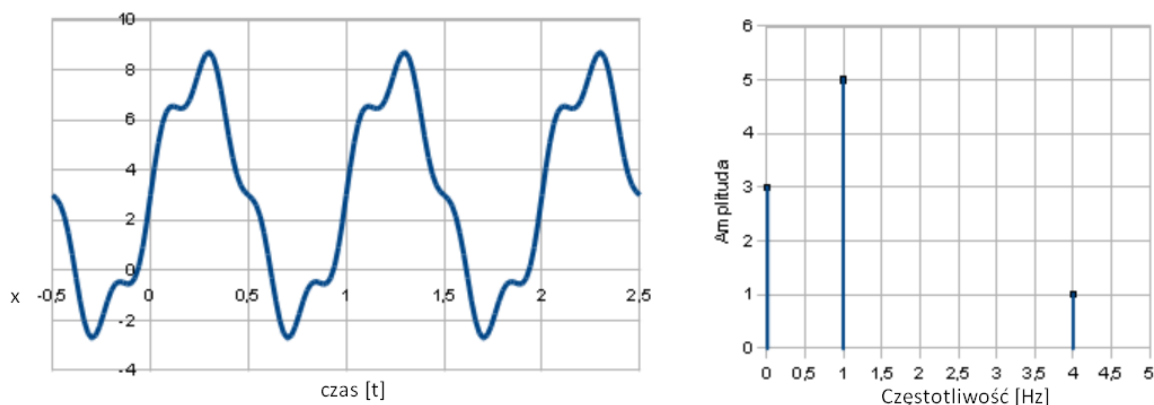


**Rys. 8 Widok sygnału wypadkowego w dziedzinie czasu i częstotliwości [7]**

Rysunek 9 w części umiejscowionej po lewej stronie przedstawia przykładowy sygnał opisany za pomocą funkcji ciągłej w dziedzinie czasu. Po poddaniu go matematycznej operacji transformacji Fouriera otrzymujemy jego widmo częstotliwościowe mające wartości zespolone. Aby uzyskać tzw. widmo amplitudowe, ukazane na rysunku prawym, należy wyznaczyć moduł wartości uzyskanej w wyniku transformacji. Moduł z liczby zespolonej 'z', gdzie 'z' zawiera wartości rzeczywiste 'a' oraz zespolone 'b', oblicza się wzorem:

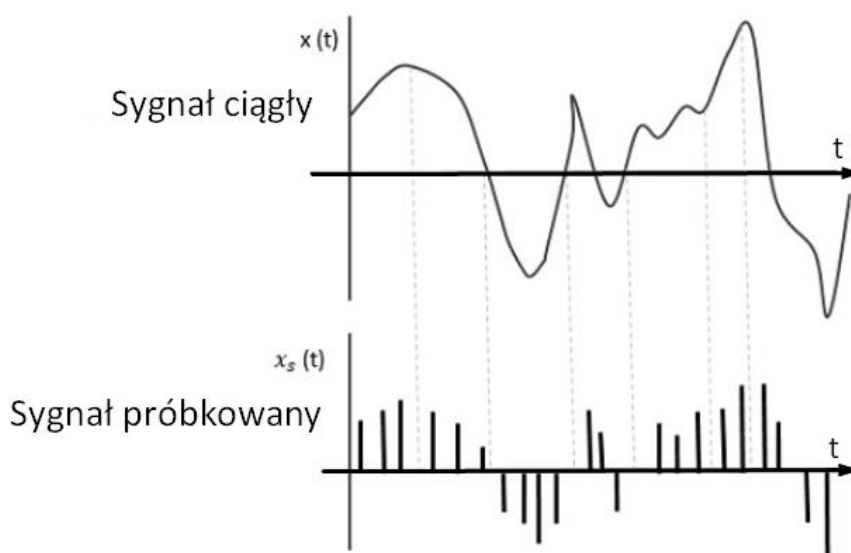
$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Na rysunku widać, że sygnał składa się z 3 składowych, pierwsza o amplitudzie równej 3, umiejscowiona na osi częstotliwości w punkcie równym 0 Hz, jest to składowa stała, dwie kolejne składowe o częstotliwościach 1 Hz oraz 4 Hz mają amplitudy o wartości odpowiednio 5 i 1.



**Rys. 9 Przykładowy sygnał x(t) oraz jego widmo częstotliwościowe [8]**

Dyskretna transformata Fouriera DFT (ang. Discrete Fourier Transform) jest przekształceniem analogicznym do transformaty Fouriera lecz wykonywana dla sygnału dyskretnego. Sygnał dyskretny, określany wyłącznie w dyskretnych chwilach czasu, jest ciągiem liczbowym. Powstaje on poprzez próbkowanie sygnału ciągłego. Podczas wykonywania badań prądu oraz napięcia sieciowego, platforma pomiarowa zwraca wyniki w postaci wartości próbek sygnału, próbkowanego z częstotliwością o odpowiednio dobranej wartości, czyli zdyskretyzowanego. Z tego powodu w dalszej części pracy do obróbki danych wykorzystana zostanie matematyczna operacja przekształcenia w postaci dyskretnej transformacji Fouriera. Warto zauważyć, że wynik operacji DFT zawsze jest widmem dyskretnym.

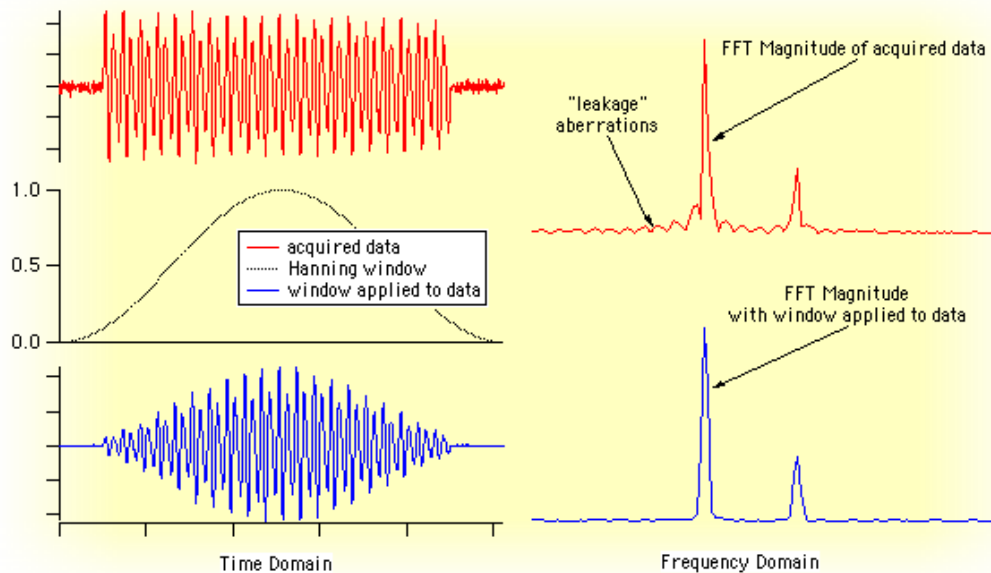


**Rys. 10 Przykładowy sygnał  $x(t)$  oraz ten sam sygnał poddany próbkowaniu [9]**

Specjalnym algorytmem do wyznaczania dyskretnej transformacji Fouriera jest FFT (ang. Fast Fourier Transform – szybka transformacja Fouriera). Przy najpopularniejszej jego wersji korzystamy z „podstawy równej 2”. Cechuje się on bardzo dobrą efektywnością pod względem czasu realizacji, jednak wektor próbek wejściowych musi mieć długość o wartości będącej potęgą liczby 2. Gdy długość wektora wejściowego jest za mała, sygnał należy uzupełnić zerami. Wynik operacji otrzymywany jest na drodze schematycznych przekształceń, opartych o struktury motylkowe. W dalszej części projektu, do pisania skryptu w języku Python wykorzystana zostanie funkcja „rfft” z biblioteki „scipy”, obliczająca jednowymiarową, dyskretną transformatę Fouriera, dla rzeczywistych danych wejściowych.

Okna czasowe są funkcjami niezerowymi w skończonym przedziale czasu, wykorzystywanymi do wydzielenia z sygnału ciągłego „odcinków” czasowych przebiegu. Jest to realizowane poprzez operację przemnożenia przesuwanej w dziedzinie czasu funkcji okna przez analizowany sygnał ciągły. Okna przyjmują maksimum na środku przedziału, względem którego funkcja jest symetryczna. Odpowiednie ich dobranie (np. często wykorzystywane w przypadku sygnałów energetycznych okno Hanninga lub Blackmana), umożliwia niwelowanie zjawiska „przecieku” widma (będącego efektem zastosowania okna prostokątnego). Zjawisko to ma miejsce gdy obliczamy FFT dla sygnału, którego czas trwania nie jest wielokrotnością okresu tego sygnału. W efekcie zamiast pojedynczych ostrych prążków, zobaczymy że wartości widma w pobliżu prążka „rozlewają się na boki” [10]. Na rysunku 11 zaprezentowane zostało działanie okna czasowego Hanninga skutkujące poprawą wyników transformaty Fouriera.

Strzałka z podpisem „leakage aberrations” wskazuje na wyżej wspomniane przecieki widma. Na niebieskim wykresie ukazano sygnał po przemnożeniu okna czasowego przez badany sygnał, a jego obliczone FFT nie posiada już niepożądanych przecieków.



**Rys. 11 Działanie okna czasowego Hanninga [11]**

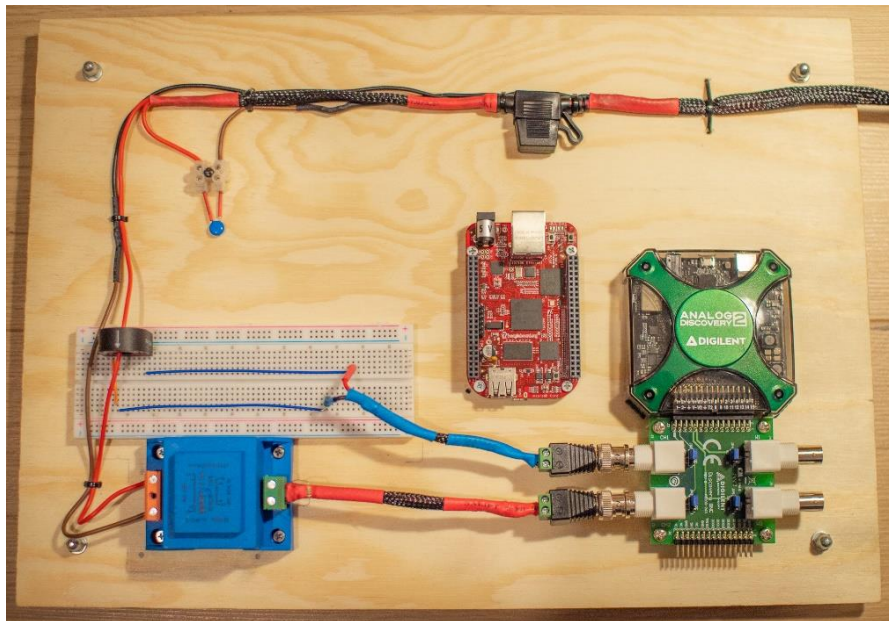
W projektowanym systemie uwzględniono możliwość wystąpienia tego zjawiska, aby go uniknąć zastosowano do „okienkowania” sygnału okno czasowe Blackmana.



## 2. Budowa interfejsu

### 2.1. Elementy fizyczne

Zaprojektowany system musiał zostać osadzony na twardej, stabilnej powierzchni, umożliwiające przejrzysty wgląd w pojedyncze elementy elektroniczne, w formie zapewniającej jego mobilność - komfortowe przemieszczanie przez operatora. Jako podstawa do montażu elementów składowych systemu została wybrana wodoodporna sklejka iglasta drugiej klasy, na bazie żywicy fenolowo-formaldehydowej, w formacie A3 (o wymiarach 297mm na 420mm) i grubości 8 mm, zapewniająca lekką, a zarazem sztywną bazę pod projekt. W czterech rogach płyty przykręcone zostały gumowe, antypoślizgowe nóżki, izolujące układ, chroniące ponadto przed wilgocią, oraz pozwalające na stabilne usytuowanie płyty podczas przeprowadzania badań z wykorzystaniem układu.



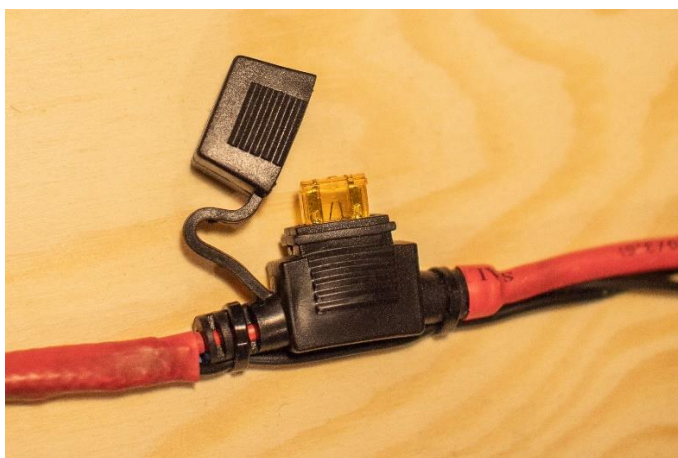
**Rys. 12 Budowa systemu**

Jako przyłączy do sieci 230V, posłużyła wtyczka płaska z dwużyłowym przewodem o przekroju  $0.5 \text{ mm}^2$ , umożliwiająca podłączenie się do modeli gniazd europejskich typu C, E, F, J, L. Wtyczka umożliwia przyłączanie do sieci zasilającej odbiorników powszechnego użytku klasy II, w których części czynne izolowane są za pomocą izolacji podwójnej lub wzmocnionej, bez zacisku ochronnego PE. Pierwszym elementem na wejściowej linii 230 V, kontrolującym przepływ prądu, jest przełącznik przesuwany PRK0069 na 2A i 250V. Pozwala

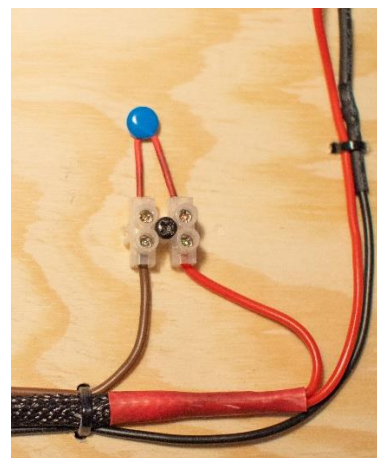
on w bezpieczny sposób odcinać dopływ prądu do układu, bez konieczności wyjmowania wtyczki bezpośrednio z gniazdka.

Obwód elektryczny układu przytwierdzony został do sklejki przy pomocy plastikowych opasek zaciskowych przeplecionych przez wywiercone dziury, w odpowiednio wyznaczonych miejscach, tak aby uniemożliwić swobodne przemieszczanie kabli po planszy, minimalizując ryzyko przypadkowego zahaczenia o któryś z nich. Aby zwiększyć bezpieczeństwo użytkownika i nie dopuścić do dotknięcia przewodu w miejscu nieizolowanym oraz zmniejszyć podatność układu na uszkodzenia w postaci przetarć i przecięć okablowania, zastosowane zostały polietylenowe rurki termokurczliwe o dostosowanych do potrzeb średnicach, oraz opłot poliestrowy, który wpływa także na poprawę estetyki całości projektu.

Na wejściu układu, za włącznikiem, zastosowany został bezpiecznik samochodowy płytkowy 5A, w hermetycznym gnieździe typu mini. Praktyczna budowa pozwala na szybką wymianę bezpiecznika, w przypadku jego przepalenia. Kolejnym elementem, który razem z bezpiecznikiem tworzy układ antyprzepięciowy jest warystor. Jego rezystancja jest zmienna i zależna od panującego napięcia elektrycznego. Wybór padł na model 7N391K o tolerancji 10%, charakteryzujący się napięciem 390V przy udarze prądowym i 250V przy warunkach pracy naszego układu, czyli napięciu przemiennym 230V. Aby wydłużyć żywotność elementu, dobrano maksymalne ciągłe napięcie na zaciskach warystora o 10% większe, od panującego w normalnych warunkach pracy systemu. Podczas normalnej pracy projektowanego systemu, przy napięciu 230V wykazuje on bardzo dużą rezystancję rzędu  $M\Omega$ , w konsekwencji czego przepływa przez niego znikomy prąd rzędu  $\mu A$ , co może symbolizować przerwę w obwodzie.



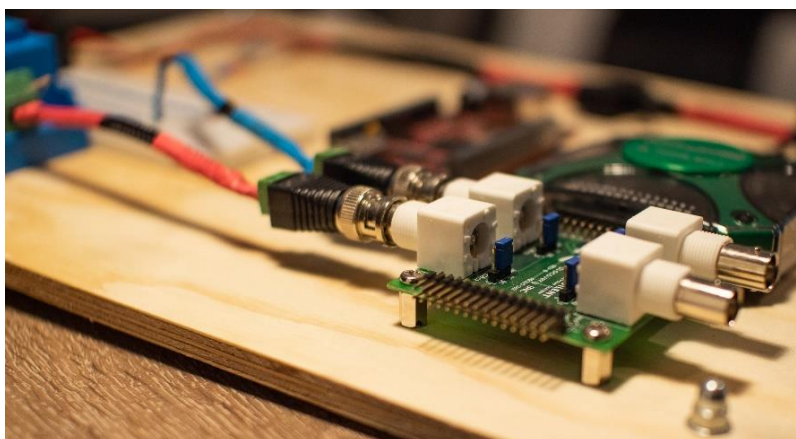
**Rys. 13 Zabudowa bezpiecznika**



**Rys. 14 Mocowanie warystora**

Gdy wyładowanie atmosferyczne, bądź awaria któregoś z sieciowych urządzeń spowoduje nagły wzrost badanego napięcia, przekraczając napięcie udarowe, rezystancja warystora maleje do poziomu kilku omów, dochodzi do zwarcia, w konsekwencji którego duże natężenie płynącego prądu przepala natychmiast bezpiecznik, odcinając tym samym układ od sieci. Dzięki temu istnieje szansa uratowania układów elektronicznych pracujących w systemie, narażonych na uszkodzenie poprzez działanie zbyt wysokiego napięcia. Omawiany element umiejscowiony został na płycie przy pomocy oczka z polietylenowej listwy zaciskowej (dla maksymalnego prądu 10A), o montażu śrubowym, co pozwala na szybką wymianę w razie jego przepalenia bądź awarii. Jego wyjścia zostały zaizolowane folią aby nie narazić użytkownika na porażenie wysokim napięciem.

System został zaprojektowany z myślą, aby umożliwiać badanie zarówno napięcia, jak i natężenia prądu w sieci energetycznej, w związku z czym urządzenie odpowiedzialne za akwizycję danych pomiarowych musi posiadać dwa osobne, niezależne kanały do wykonywania badań.

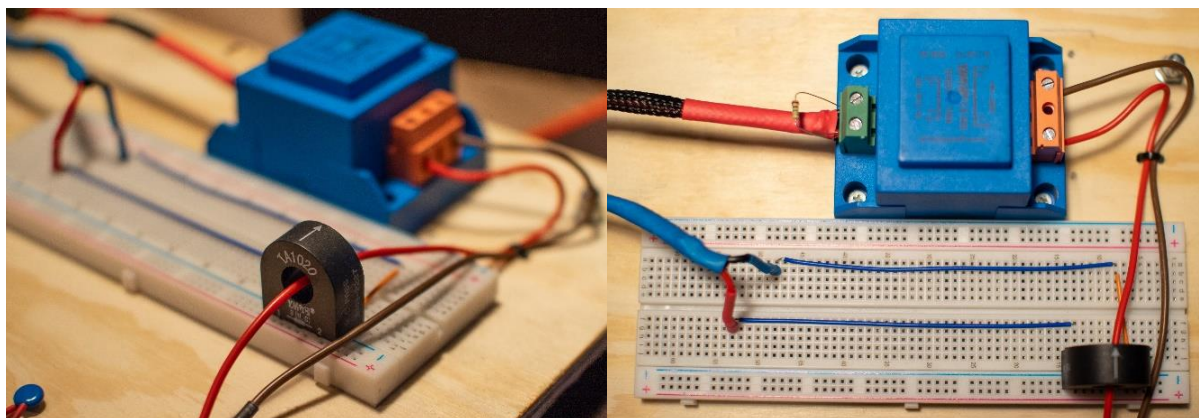


**Rys. 15 Mocowanie adaptera BNC wraz z oscyloskopem**

Pierwszy tor pomiarowy odpowiedzialny jest za kondycjonowanie sygnału napięcia sieciowego z gniazdka do postaci pozwalającej na interpretację sygnału przy wykorzystaniu oscyloskopu. Z dokumentacji technicznej urządzenia pomiarowego wynika, iż maksymalne dopuszczalne napięcie na wejściu obu kanałów wynosi  $\pm 25$  V. Aby osiągnąć optymalną wartość z zakresu napięć pomiarowych, na wejściu wykorzystano transformator sieciowy TE4825, pozwalający zmniejszyć napięcie przemienne z 230V, na bezpieczne 6V. Transformator o mocy 15VA, wypełniony żywicą epoksydową, odporny na uszkodzenia mechaniczne, przystosowany do montażu na płycie, jest to najcięższy element systemu więc

przykręcony został obustronnie do płyty śrubami, jego wyjścia zaciskowe współgrają z konceptem układu przytwierdzonego do drewnianej sklejki. Linia z ograniczonym napięciem za transformatorem, posiada w obwodzie równolegle podłączony rezystor węglowy THT CF o rezystancji  $1\text{M}\Omega$ , na którym odkłada się napięcie badane przez jeden z kanałów w oscyloskopie (poprzez wtyk BNC z wejściami zaciskowymi).

Drugi tor pomiarowy odpowiedzialny jest za umożliwienie badania sygnału natężenia prądu z sieci energetycznej, również przy pomocy oscyloskopu. Układ został opracowany na bazie przekładnika prądowego TA1020B, o przekładni prądowej 1:1000, co daje  $1\text{mA}$  prądu wyjściowego, gdy na wejściu podawane jest natężenie  $1\text{A}$ . Element posiada rdzeń nanokrystaliczny i obciążenie znamionowe  $50\Omega$ . Znając rezystancję panującą na zaciskach, przy założeniu że jednocześnie na drugim kanale oscyloskopu badamy przebieg napięcia, jesteśmy w stanie odzwierciedlić wynik natężenia pobieranego prądu. Przekładnik posiada wyjścia w postaci pinów zaciskowych (zaciski śrubowe). Aby przejrzystość doprowadzić połączenie do oscyloskopu, wykorzystana została płytka stykowa (830 otworów), przyklejona na taśmie dwustronnej, wraz z zestawem zworek oraz wtyk BNC z wejściami zaciskowymi, podobnie jak w przypadku pierwszego kanału.



**Rys. 16-17 Umiejscowienie przekładnika prądowego oraz transformatora**

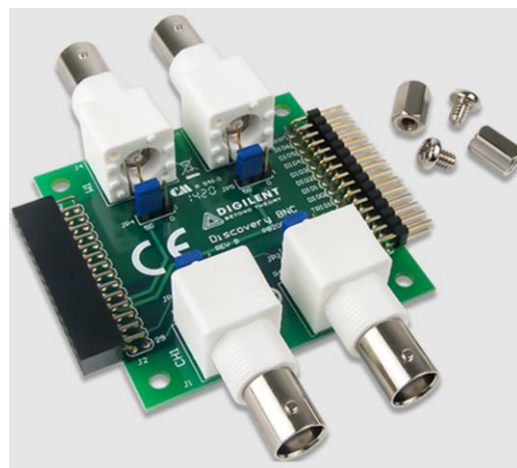


## 2.2. Platformy sterujące

Jako platformę pomiarową wybrano Analog Discovery 2 firmy Digilent, opracowany we współpracy z firmą Analog Devices oraz Cypress Semiconductor, wspierany przez program uniwersytecki Xilinx. Zestaw posiada adapter BNC do podłączenia obydwu badanych kanałów. Układ posiada możliwość programowania poprzez interfejs micro USB, po podłączeniu komputera sterującego i uruchomieniu odpowiednio napisanych skryptów. Urządzenie przymocowano do podłoża za pomocą śrub M3x14, które wykorzystane zostały także do montażu pozostałych elementów oraz 10mm metalowych dystansów, izolując moduł od sklejk. Analog Discovery 2 to wielofunkcyjne urządzenie testowo-pomiarowe, które może pracować jako oscyloskop, generator przebiegów, zasilacz, woltomierz, analizator stanów logicznych, analizator widma, analizator obwodów, analizator protokołów, a po zakupie dodatkowego modułu, analizator impedancji.



Rys. 18 Moduł Analog Discovery 2 [12]

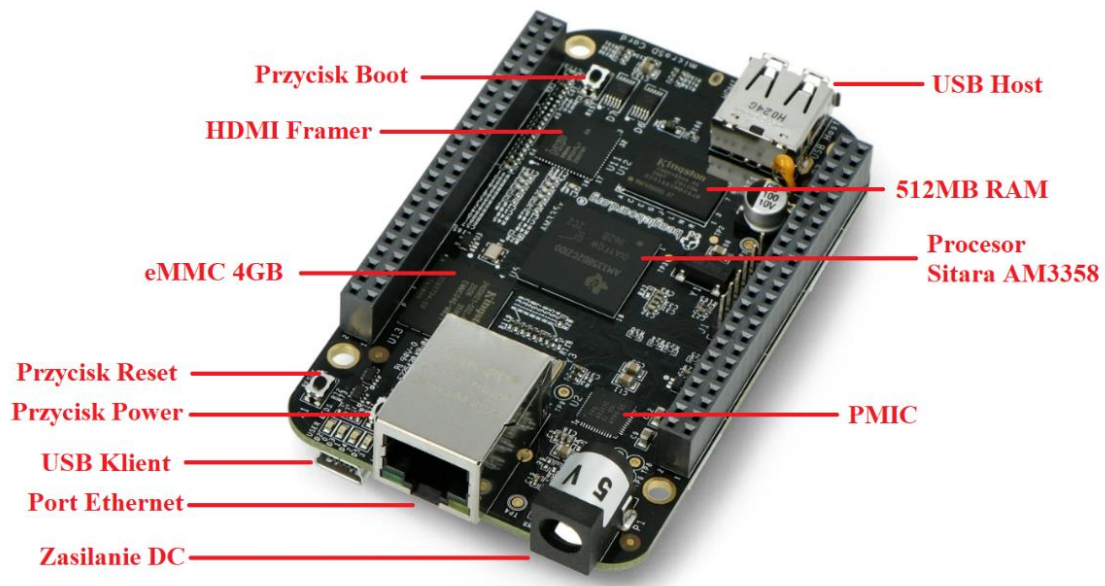


Rys. 19 Adapter BNC [13]

Najważniejsze elementy wyposażenia platformy:

- 2-kanałowy oscyloskop ( $1\text{M}\Omega$ ,  $\pm 25\text{V}$ , wejście różnicowe, 14-bit,  $100\text{MS/s}$ )
- 2-kanałowy generator arbitralny ( $\pm 5\text{V}$ , 14-bit,  $100\text{MS/s}$ )
- stereofoniczny wzmacniacz audio
- 16-kanałowy analizator logiczny
- 16-kanałowy generator przebiegów cyfrowych
- 16 wirtualnych wejść/wyjść cyfrowych
- woltomierz (AC, DC,  $\pm 25\text{V}$ )

Jako moduł komputera centralnego, sterującego oscyloskopem wybrano mikrokomputer BeagleBone Black Revision C, wyprodukowany przez firmę Texas Instruments we współpracy z Digi-Key oraz Newark Electronics. Platforma oparta została na procesorze AM3358 ARM Cortex-A8, taktowanym częstotliwością 1GHz, z 512MB pamięci RAM. Po podłączeniu urządzenia portem mini USB przez złącze USB-A do nadrzędnego komputera, tworzony jest automatycznie wirtualny interfejs sieciowy, a programowanie odbywa się poprzez oparte na chmurze, zintegrowane środowisko programistyczne Cloud9. Umożliwia ono dostęp do pełnego serwera z systemem operacyjnym Linux, pisanie, uruchamianie i debugowanie kodu za pomocą przeglądarki internetowej.



**Rys. 20 Układ platformy BeagleBone Black [14]**

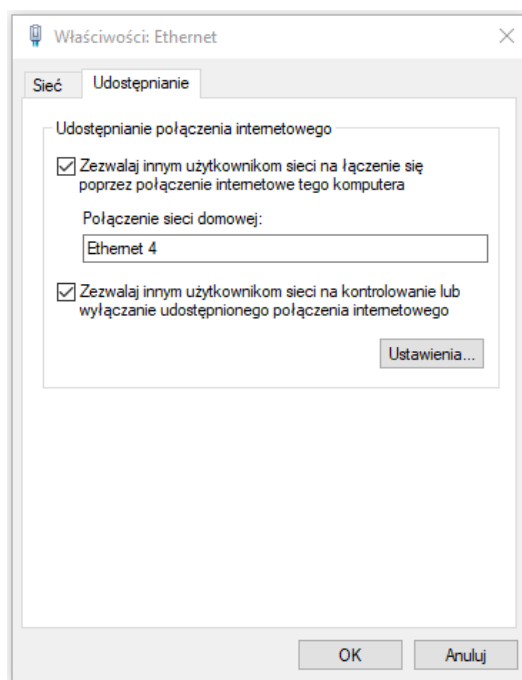
Najważniejsze elementy wyposażenia platformy:

- Procesor: TI Sitara AM3358 1GHz ARM® Cortex-A8
- Pamięć RAM: 512MB DDR3L 400MHz
- Pamięci Flash: wbudowane eMMC 4GB
- Wyjście wideo: micro HDMI
- Slot na karty pamięci microSD
- Gniazdo Ethernet
- USB – Klient oraz Host
- 2 x 46 pinów I/O

### 3. Budowa środowiska

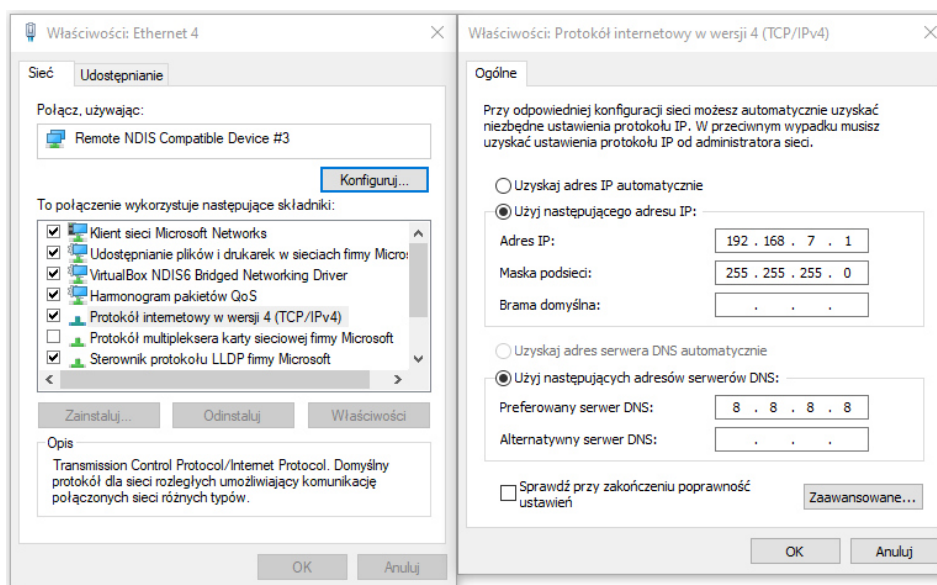
#### 3.1. Konfiguracja interfejsów

Pracę nad środowiskiem programistycznym rozpoczęto od podłączenia platformy BeagleBone Black do komputera stacjonarnego z zainstalowanym systemem Windows 10, poprzez interfejs USB. Automatycznie tworzony jest wirtualny interfejs sieciowy „Ethernet 4” który po wcześniejszej konfiguracji, posłuży do wymiany danych między komputerem stacjonarnym, a platformą BeagleBone. Konfigurację rozpoczęto od otworzenia ścieżki w systemie Windows, Panel sterowania \ Sieć i Internet \ Połączenia sieciowe, gdzie wyświetlone są poszczególne interfejsy sieciowe. Interfejs komputera stacjonarnego o nazwie „Ethernet”, który jest podłączony do zewnętrznej sieci internetowej został udostępniony, dla wirtualnego interfejsu naszej płytki „Ethernet 4”, dzięki użyciu opcji Właściwości.



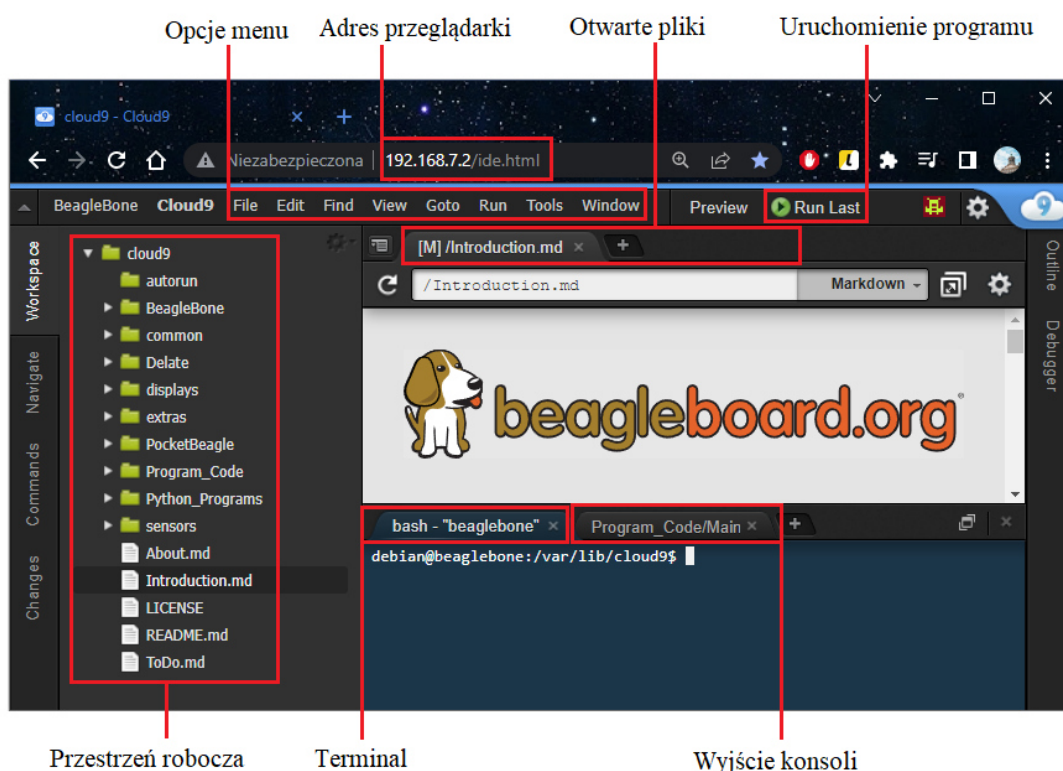
**Rys. 21 Konfiguracja interfejsu PC – Sieć**

Interfejs „Ethernet 4” konfigurowany jest w zakładce „Protokół internetowy w wersji 4 (TCP/IPv4)”, zgodnie z zaleceniem producenta [15]. Dla połączenia poprzez USB w systemie operacyjnym Windows, musi zostać ustawiony adres statyczny IP 192.168.7.1, maska podsieci 255.255.255.0 oraz adres IP 8.8.8.8 dla preferowanego serwera DNS.



**Rys. 22 Konfiguracja interfejsu PC – BeagleBone Black**

Oba urządzenia znajdują się w tej samej sieci 192.168.7.0 co umożliwia dostęp do BeagleBone Black poprzez środowisko Cloud9, z poziomu przeglądarki komputera, po wpisaniu domyślnego adresu urządzenia 192.167.7.2 w jej pasek adresu. W projekcie została wykorzystana przeglądarka internetowa Google Chrome.



**Rys. 23 Środowisko IDE Cloud9**



## 3.2. Konfiguracja środowiska

Mikrokomputer BeagleBone Black wykorzystuje system operacyjny Linux Debian w wersji 10.3. Konfiguracja systemu realizowana jest z poziomu praw administratora, w tryb którego wchodzi się komendą „su” podając domyślne hasło „root”.

Do instalacji programów oraz pakietów w systemie Debian posłużono się poleceniem `apt-get` z zestawu narzędzi APT (ang. Advanced Packaging Tool). APT upraszcza proces instalacji i usuwania oprogramowania w systemach uniksowych poprzez automatyczne ściąganie pakietów z sieci internetowej [16]. Po aktualizacji komendą `sudo apt-get update` można jej używać do zarządzania operacjami oprogramowania. Narzędzie to przeszukuje listy pakietów oraz ich zależności i automatycznie pobiera, instaluje i konfiguruje potrzebne pliki. Za system zarządzania pakietami dla środowiska języka Python odpowiada Pip Installs Packages. Umożliwia on pobieranie, usuwanie i zmianę wersji pakietów. Korzysta z dedykowanego repozytorium pakietów o nazwie Python Package Index lub z innych zdalnych oraz lokalnych repozytoriów [17].

W celu uzyskania z systemu operacyjnego nazwy interfejsu sieciowego wykorzystywanego do wymiany danych, zastosowana została komenda `ifconfig`, która wyświetliła parametry pracy szukanego interfejsu o nazwie `usb0`.

```
root@beaglebone:/var/lib/cloud9# ifconfig
lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
    inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
    inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10<host>
    loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
    RX packets 63944 bytes 22344978 (21.3 MiB)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 63944 bytes 22344978 (21.3 MiB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

usb0: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
    inet 192.168.7.2 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.7.255
    inet6 fe80::1642:fcff:fe0c:9e8d prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
    ether 14:42:fc:0c:9e:8d txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 20343 bytes 11404431 (10.8 MiB)
    RX errors 0 dropped 21 overruns 0 frame 0
    TX packets 18792 bytes 9704947 (9.2 MiB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

usb1: flags=4099<UP,BROADCAST,MULTICAST> mtu 1500
    inet 192.168.6.2 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.6.255
    inet6 fe80::1642:fcff:fe0c:9e91 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
    ether 14:42:fc:0c:9e:91 txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 45 bytes 8571 (8.3 KiB)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 51 bytes 8569 (8.3 KiB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

Rys. 24 Interfejsy sieciowe Beagle Bone Black

Aby umożliwić systemowi komunikację z zewnętrzną siecią internetową, dla interfejsu usb0 dodana została brama domyślna o adresie IP 192.168.7.1, który jest adresem interfejsu komputera. W celu sprawdzenia poprawności wykonania polecenia, wywołana została komenda `route -n` która potwierdziła, że pakiety wysyłane na wszystkie adresy docelowe kierowane będą poprzez ustawioną bramę.

```
root@beaglebone:/var/lib/cloud9# route -n
```

Kernel IP routing table						
Destination	Gateway	Genmask	Flags	Metric	Ref	Use Iface
0.0.0.0	192.168.7.1	0.0.0.0	UG	0	0	0 usb0
192.168.6.0	0.0.0.0	255.255.255.0	U	0	0	0 usb1
192.168.7.0	0.0.0.0	255.255.255.0	U	0	0	0 usb0

**Rys. 25** Tablica routingu Beagle Bone Black

Konfiguracja sieciowa używanej maszyny z systemem Linux zapisana jest w pliku `/etc/network/interfaces`. Do jego edycji użyto edytora `nano`, za pomocą którego wpisano oraz zapisano sekwencję poleceń:

```
auto usb0
iface usb0 inet static
    address 192.168.7.2
    netmask 255.255.255.0
    gateway 192.168.7.1
    dns-nameserver 192.168.7.1
    dns-nameserver 8.8.8.8
    dns-search foo.org bar.com
```

W pliku konfiguracyjnym znajdują się polecenia odpowiedzialne za włączenie interfejsu karty sieciowej usb0 przy uruchomieniu systemu, ustalenie statycznej adresacji oraz adres IP interfejsu, maski, bramy i serwera DNS. Po konfiguracji należy zrestartować karty sieciowe poleceniem `sudo /etc/init.d/networking restart`.

Aby wyeliminować resetowanie adresu serwera DNS po każdorazowym restarcie platformy, należy posłużyć się programem `resolvconf`, który odpowiedzialny jest za utrzymywanie aktualnych informacji systemowych o serwerach DNS. DNS to skrót od ang. Domain Name System - jest to hierarchiczny rozproszony system nazw sieciowych odpowiedzialny za

tłumaczenie mnemonicznych nazw stron internetowych składających się z liter, cyfr bądź słów przyjaznych dla ludzi (przykładowo [www.google.com](http://www.google.com)), na liczbowe adresy IP (108.177.16.0) [18].

Po wcześniejszej instalacji usługi, jej uruchomienie następuje poprzez komendy:

```
sudo systemctl start resolvconf.service
```

oraz

```
sudo systemctl enable resolvconf.service”.
```

Dzięki komendzie

```
sudo echo nameserver 8.8.8.8 > /etc/resolv.conf
```

do pliku konfiguracyjnego `resolv.conf` wpisany został adres IP bezpłatnego i publicznego serwera DNS Google LLC.

Po odpowiedniej konfiguracji interfejsów sieciowych, środowiska oraz systemów zarządzania pakietami, zainstalowano biblioteki niezbędne do kompatybilnego współdziałania napisanego w języku Python skryptu z systemem mikrokomputera oraz środowiskiem platformy Analog Discovery 2. Do komunikacji mikrokomputera z przystawkami pomiarowymi firmy Digilent zainstalowane zostały (koniecznie w odpowiedniej kolejności), środowisko współpracujące z systemem Linux, WaveForms Runtime w najnowszej wersji 2.26.1 oraz WaveForms Utilities w wersji 2.7.1, z których korzystać będzie biblioteka DWF, a następnie oprogramowanie Digilent WaveForms. Składają się one z współdzielonych bibliotek, obrazów oprogramowania i plików konfiguracyjnych. Producent zapewnia dostępność wersji oprogramowania dla systemu 32 i 64 bitowego, oraz dla platform z procesorem ARM - taka wersja wykorzystana do projektu z racji używania platformy Beagle Bone. Po instalacji, biblioteka dynamiczna razem z plikami konfiguracyjnymi w systemie Linux umiejscowiona jest w katalogu `/usr/lib/digilent/adept` [19].

Całe oprogramowanie potrzebne do pisania własnych aplikacji zapewniane jest przez WaveForms SDK. Udostępnia ono dokumentację, biblioteki plików, nagłówki umożliwiające dostęp do interfejsu API (ang. Application Programming Interface) dla biblioteki DWF. API daje użytkownikowi możliwość pisania własnych, niestandardowych aplikacji. Wykorzystywane są one do łączenia aplikacji, co umożliwia wykonywanie zaprojektowanych funkcji, które zwykle zbudowane są wokół wykonywania predefiniowanych procesów i udostępniania danych [20]. Podstawowe użycie w projekcie WaveForms API może być opisane za pomocą poniższych kroków:

1. Wywołanie funkcji identyfikującej podłączone urządzenia sprzętowe.
2. Wywołanie funkcji nawiązującej połączenie z urządzeniem.
3. Wywołanie funkcji uruchamiającej podłączone urządzenie.
4. Wywołanie zestawu funkcji konfigurujących tryb akwizycji odpowiedniego kanału.
5. Wywołanie funkcji startu i stopu akwizycji danych.
6. Wywołanie funkcji kopiującej pobrane dane do dostarczonego bufora.
7. Wywołanie funkcji resetującej konfigurację akwizycji kanału.
8. Wywołanie funkcji do zerwania połączenia z urządzeniem.

Zaprojektowany system używa do komunikacji mikrokomputera z platformą Analog Discovery 2 zbioru funkcji z biblioteki DWF, które zostały opisane w tabeli 1.

Tabela 1. Funkcje z biblioteki DWF

Nazwa funkcji	Argumenty	Opis	Parametry
FDwfGetVersion	(char szVersion[32])	Zwraca wersję oprogramowania i wpisuje do dostarczonego buforu	szVersion – Pointer do bufora otrzymującego zmienną typu string
FDwfDeviceConfigOpen	(int idxDevice, int idxCfg, HDWF *phdwf)	Otwiera połączenie z urządzeniem	idxDevice – indeks urządzenia idxCfg – indeks konfiguracji phdwf – Pointer do zmiennej aby utrzymać identyfikator interfejsu
FDwfGetLastErrorMsg	(char szError[512])	Pobiera ostatni komunikat o błędzie	SzError – Pointer do bufora otrzymującego zmienną typu string
FDwfAnalogInChannelEnableSet	(HDWF hdwf, int idxChannel, int fEnable)	Uruchamia kanał oscyloskopu	hdwf – Interface identyfikatora idxChannel – indeks kanału fEnable – zmienna do uruchomienia lub wyłączenia kanału
FDwfAnalogInChannelRangeSet	(HDWF hdwf, int idxChannel, double voltsRange)	Konfiguruje zakres dla kanału	idxChannel – indeks kanału voltsRange – zakres napięcia
FDwfAnalogInAcquisitionModeSet	(HDWF hdwf, ACQMODE acqmod)	Konfiguruje tryb akwizycji danych	acqmod – tryb akwizycji
FDwfAnalogInFrequencySet	(HDWF hdwf, double hzFrequency)	Konfiguruje częstotliwość	phzFrequency – częstotliwość

		próbkowania sygnału	
FDwfAnalogInRecordLengthSet	(HDWF hdwf, double sLegth)	Ustawia czas akwizycji danych	sLegth – czas w sekundach
FDwfAnalogInConfigure	(HDWF hdwf, int fReconfigure, int fStart)	Konfiguracja urządzenia, uruchomienie akwizycji	fReconfigure – konfiguracja fStart – start
FDwfAnalogInStatus	(HDWF hdwf, int fReadData, DwfState *psts)	Sprawdza stan akwizycji	fReadData – jeśli dane powinny być odbierane to ustawiony na TRUE psts – zmienna do której zapisywany jest stan akwizycji
FDwfAnalogInStatusRecord	(HDWF hdwf, int *pcdDataAvailable, int *pcdDataLost, int *pcdDataCorrupt)	Pobiera informacje o procesie akwizycji, służy do detekcji błędów	pcdDataAvailable – pointer do odczytu dostępnych próbek pcdDataLost – pointer do odczytu utraconych próbek pcdDataCorrupt – pointer do odczytu próbek które mogły zostać przekłamate
FDwfAnalogInStatusData	(HDWF hdwf, int idxChannel, double *rgdVoltData, int cdData)	Kopiuje pobrane próbki do wskazanego bufora	idxChannel – indeks kanału rgdVoltData – pointer do alokacji pobranych danych cdData – liczba pozostałych do skopiowania próbek
FDwfAnalogOutReset	(HDWF hdwf, int idxChannel)	Resetuje konfigurację kanału	idxChannel – indeks kanału

Do poprawnego działania środowiska zainstalowane zostały również biblioteki:

- libQt5ScriptTools5 – wieloplatformowy framework do programowania komputerów stacjonarnych oraz systemów wbudowanych embedded. Umożliwia programistom tworzenie zaawansowanych aplikacji GUI oraz ich wdrażanie [21].
- libqt5quick5-gles - Qt Quick to zbiór technologii, które mają pomóc programistom w tworzeniu intuicyjnych, nowoczesnych, płynnych interfejsów użytkownika. Zainstalowany pakiet opiera się na OpenGL ES dla systemów mobilnych oraz systemów wbudowanych embedded [22].

- xdg-utils - to zestaw narzędzi, który umożliwia aplikacjom łatwą integrację ze środowiskiem graficznym użytkownika, niezależnie od konkretnego środowiska graficznego, z którego korzysta użytkownik [23].
- libusb - to biblioteka C, która zapewnia dostęp do urządzeń USB. Jest przeznaczona do użytku przez programistów w celu ułatwienia tworzenia aplikacji komunikujących się ze sprzętem USB [24].

## 4. Aplikacja użytkownika

### 4.1. Implementacja praktyczna

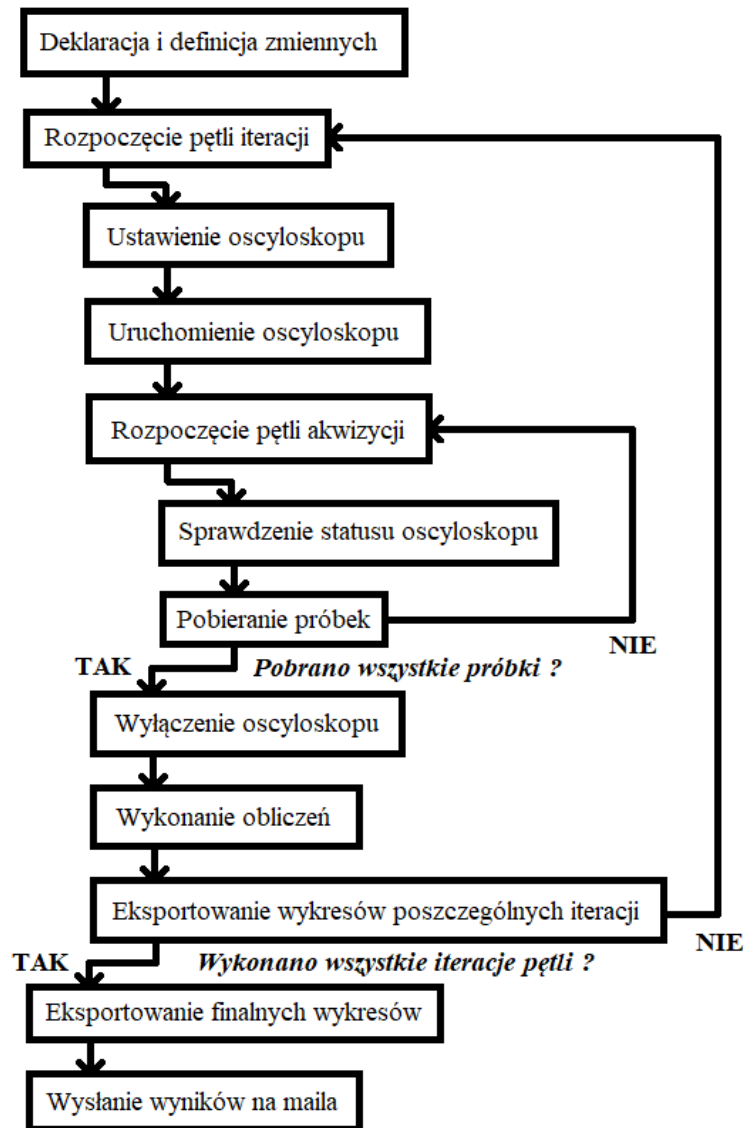
Do napisania skryptu obsługującego zaprojektowany system posłużono się językiem Python w wersji 3. Dzięki możliwości wykorzystania szerokiej gamy odpowiednich bibliotek lub frameworków pozwala on na bardzo różnorodne i szerokie zastosowanie, przez co wiele firm chętnie używa go w swoich aplikacjach. Wykorzystuje interpretery, które są dostępne dla wielu systemów, co czyni go językiem wieloplatformowym. Dla tego języka priorytetem nie jest wydajność, lecz łatwość użytkowania, czytelność i efektywność. Aktualnie, najintensywniej użytkowany jest w dziedzinach „machine learning” oraz „data science” [25].

Działanie skryptu opracowanego do obsługi systemu analizy jakości energii elektrycznej sprowadza się do wykonania kroków przedstawionych na rysunku nr 26.

Użytkownik ma możliwość zmiany parametrów odpowiedzialnych za częstotliwość próbkowania sygnału. Aby uniknąć efektu aliasingu (zachodzenia na siebie sąsiednich widm częstotliwościowych), wartość ta powinna być większa bądź równa 4000Hz.

Kolejną wartością podlegającą korekcji jest parametr „Preview”. Definiująca go liczba określa ilość okresów badanego sygnału napięcia i natężenia, przedstawionego w dziedzinie czasu na wykresie wynikowym.

Ostatnim parametrem definiowanym przez użytkownika jest okres czasu akwizycji sygnału, ustalany przez wprowadzenie pożądanej liczby sekund i minut. Ze względu na wprowadzone przez platformę BeagleBone Black ograniczenia techniczne, związane z pojemnością pamięci RAM, maksymalny okres pomiaru sygnału sprowadza się do 5 minut. Aby wydłużyć czas pomiarów, tym samym osiągnąć wyniki o wyższej dokładności poprzez uwzględnienie dłuższego okresu czasowego, posłużono się pętlą obejmującą kluczowe fragmenty kodu takie jak ustawienia oscyloskopu, akwizycje danych oraz eksportowanie wykresów. Użytkownik jest w stanie zwielokrotnić 5 minutowy okres czasowy do wartości obejmujących godziny, dzięki ustawieniu odpowiedniej wartości parametru „Iteration”, który definiuje liczbę wykonań 5 minutowej pętli pomiarowej.



**Rys. 26 Algorytm działania programu**

Skrypt wykorzystuje wiele bibliotek pozwalających na wdrożenie potrzebnych funkcji, wykonanie niezbędnych obliczeń, oraz zaimplementowanie obsługi systemu w czasie rzeczywistym.

Biblioteka `ctypes`, pozwala uzyskać typy danych z środowiska języka C takich jak `int`, `double` lub `char`, oraz umożliwia wywoływanie funkcji z bibliotek DLL lub bibliotek współdzielonych [26]. Jej użycie jest konieczne do prawidłowego działania zbioru funkcji z biblioteki DWF używanej do komunikacji z oscyloskopem, przedstawionych w poprzednim rozdziale, gdyż typ podawanych argumentów wywodzi się z języka C.



Do „czyszczenia” wyjścia terminala wykorzystano funkcję `system('clear')` z biblioteki `os`. Moduł udostępnia możliwości zależne od systemu operacyjnego, poszukuje wbudowanych modułów, a następnie eksportuje odnalezione w nich funkcje i dane [27].

Biblioteka `time` wprowadza do programu funkcję `sleep`, której użycie pozwala na oczekiwanie pewnej zdefiniowanej chwili czasowej przed rozpoczęciem badania sygnału, tak aby sygnał został ustabilizowany.

Kolejną biblioteką jest moduł `datetime`. Dostarcza klasy pozwalające obsługiwać arytmetykę wartości dat i godzin [28]. Wykorzystana została do obliczenia całkowitego czasu operacji wykonywania programu.

Biblioteka `smtplib` pozwala na wysyłanie poczty elektronicznej z dowolnej maszyny z połączeniem internetowym, oraz z nasłuchującym procesem SMTP lub ESMTP. Bazuje na protokole SMTP (ang. Simple Mail Transfer Protocol), obsługującym wysyłanie wiadomości email i przekierowywanie wiadomości między serwerami pocztowymi [29]. W skrypcie, biblioteka ta została użyta do wysyłania na podany przez użytkownika adres email, wyników badań zawierających obliczone wartości THD dla napięcia i natężenia, oraz sumaryczny czas operacji obliczony dzięki wspomnianej wcześniej bibliotece `datetime`.

```
email = "wozniak_test@gmail.com"
password = "htcgoprxyzrpuhhc"
message = ""
After time: "" + str(AcqTime*Iteration) + ""s\n
Final Total Harmonic Voltage Distortion : "" + str(THD(Final_Harmonic_Voltage)) + "" %\n
Final Total Harmonic Current Distortion : "" + str(THD(Final_Harmonic_Current)) + "" %\n
Total operation time: "" + str(Finish_Time-Start_Time)

with smtplib.SMTP(host="smtp.gmail.com", port=587) as connection:
    connection.starttls()
    connection.login(user=email, password=password)
    connection.sendmail(
        from_addr=email,
        to_addrs=email,
        msg=message.encode("utf-8")
    )
```

**Rys. 27** Fragment kodu odpowiedzialny za wysyłanie wyników badań na maila

Biblioteką implementującą funkcje, na których opierane są wszystkie obliczenia matematyczne, jest `numpy`. Zapewnia ona funkcje, które umożliwiają programistom wykonywanie podstawowych, jak i zaawansowanych funkcji matematycznych i statystycznych, na wielowymiarowych tablicach oraz macierzach, przy użyciu niewielkiej

liczby wierszy kodu [30]. W zaprojektowanym skrypcie, użycie biblioteki sprowadza się do utworzenia wektora liczb o długości równej liczbie pobranych próbek, reprezentującego czasowe okno Blackmana, które zostało nałożone na wektor próbek czasowych badanego sygnału, otrzymanych z oscyloskopu. Następnie, aby otrzymać widmo częstotliwościowe opisane w rozdziale 1, na wektorze danych realizowana jest funkcja `rfft`, która oblicza jednowymiarową dyskretną transformatę Fouriera, za pomocą algorytmu FFT. Z wektora wynikowego obliczona zostaje wartość bezwzględna przez działanie funkcji `abs`. Ponadto, aby wartości widmowe reprezentowały energię poszczególnych składowych, widmo zostało przeskalowane - zrealizowano to dzieląc je przez połowę długości transformaty. Wykorzystana została połowa długości transformaty, ponieważ energia sygnału rozkłada się równomiernie na dwie części widma, a częścią obserwowalną jest tylko jedna z nich. Do obliczenia rzeczywistych wartości częstotliwości dla każdego punktu, wykorzystano funkcję `rfftfreq`, której argumentami są wartości widma oraz okres próbkowania.

```
window = np.blackman(Acquisition_Samples)
rgdSamples_Voltage_FFT = rgdSamples_Voltage_FFT*window
rgdSamples_Current_FFT = rgdSamples_Current_FFT*window

X_oneside_Voltage = np.abs(np.fft.rfft(rgdSamples_Voltage_FFT))/(len(rgdSamples_Voltage_FFT)/2)
X_oneside_Current = np.abs(np.fft.rfft(rgdSamples_Current_FFT))/(len(rgdSamples_Current_FFT)/2)
f_oneside = np.fft.rfftfreq(len(rgdSamples_Voltage_FFT), 1/Hz)
```

**Rys. 28** Fragment kodu odpowiedzialny za okno czasowe oraz transformatę Fouriera

Kolejną, mocno rozbudowaną wieloplatformową biblioteką jest `matplotlib`. Służy do tworzenia różnego rodzaju wykresów 2D, 3D oraz do ich eksportowania w dogodnej postaci. Zawiera API `pylab`, wzorowane wizualnie na oprogramowaniu Matlab, przez co jest bardzo intuicyjne dla użytkowników [31]. Użyta została do wyeksportowania wyników badań do pamięci platformy BeagleBone, z zastosowaniem odpowiednio opisanych osi, w postaci plików o rozszerzeniu `.png`. Na rysunku 29 przedstawiono przykładowe użycie biblioteki do prezentacji wyników w postaci wykresu słupkowego, reprezentującego stosunek procentowy poszczególnych harmonicznych, do pierwszej harmonicznej, wraz z odpowiednim skalowaniem osi w celu zwiększenia czytelności wyników.

```

plt.figure(figsize=(15,5))
y_pos = np.arange(0, 39, 1)
plt.bar(y_pos+2, Harmonic_Voltage_Rat, color = '#808080')
plt.xticks(np.arange(2, 41, 1))
for i in range(len(Harmonic_Voltage_Rat)):
    Harmonic_Voltage_Rat[i] = round(Harmonic_Voltage_Rat[i], 2)
    if Harmonic_Voltage_Rat[i] == 0 or Harmonic_Voltage_Rat[i] < 0.05:
        Harmonic_Voltage_Rat[i] = int(0)
        plt.annotate(Harmonic_Voltage_Rat[i], (y_pos[i]+1.8, Harmonic_Voltage_Rat[i]+0.01))
    else:
        plt.annotate(Harmonic_Voltage_Rat[i], (y_pos[i]+1.4, Harmonic_Voltage_Rat[i]+0.05*Harmonic_Voltage_Rat[i]))
plt.ylim([0, 1.15*max(Harmonic_Voltage_Rat)])
plt.xlabel('Numer harmonicznej', fontsize = 12)
plt.ylabel('Stosunek do 1 harmonicznej [%]', fontsize=12)
plt.title('Stosunek harmonicznych napięcia', fontsize=16)
plt.savefig('Ratio/Harmonic_Voltage_Rat_' + str(datetime.now()) + '.png', bbox_inches='tight')
plt.cla()
plt.clf()
plt.close()

```

**Rys. 29** Fragment kodu odpowiedzialny za prezentację wyników stosunku harmonicznych napięcia

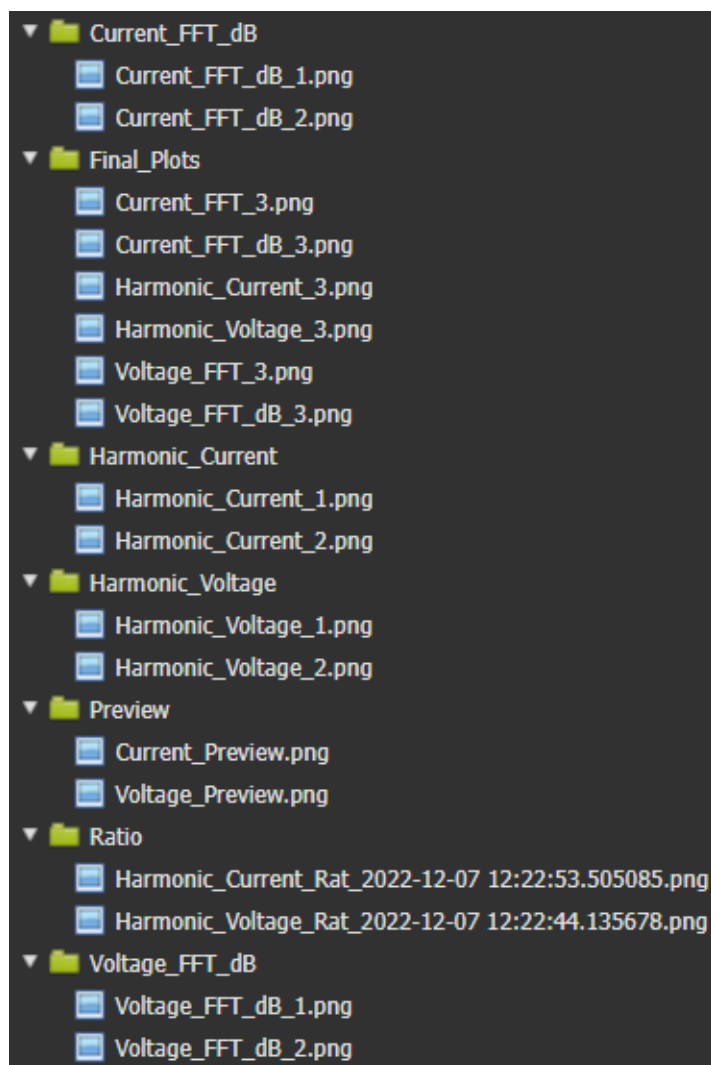
## 4.2. Wizualizacja wyników

System został zaprojektowany aby dostarczyć użytkownikowi wyniki pomiarów i obliczeń. Istotne jest oczywiście aby zrobić to w jak najbardziej przystępnej formie. Dzięki możliwościom jakie oferuje język Python oraz biblioteka `matplotlib`, napisany skrypt sprowadza wykonane pomiary oraz obliczenia do jednowymiarowych wektorów, które następnie są wizualizowane za pomocą wykresów eksportowanych do pamięci wewnętrznej platformy BeagleBone. Wykresy są zapisywane do dedykowanych folderów. Program po każdorazowym przejściu pętli akwizycji sygnału, o okresie ustawionym przez użytkownika, zapisuje wyniki obliczonych transformat FFT w skali decybelowej, oraz wykresy słupkowe poszczególnych wartości harmonicznej od 1 do 40, dla napięcia i natężenia, dokładając do nazwy pliku numer iteracji wykonanej pętli.

Do folderu `Preview` trafiają wykresy przedstawiające sygnał napięcia oraz natężenia w dziedzinie czasu. Wykresy te, eksportowane są przy wykonywaniu ostatniej iteracji pętli, pozwala to na zdiagnozowanie ewentualnych problemów, gdyby w trakcie wcześniejszego wykonywania programu doszło do usterki, takiej jak mechaniczne rozwarcie obwodu.

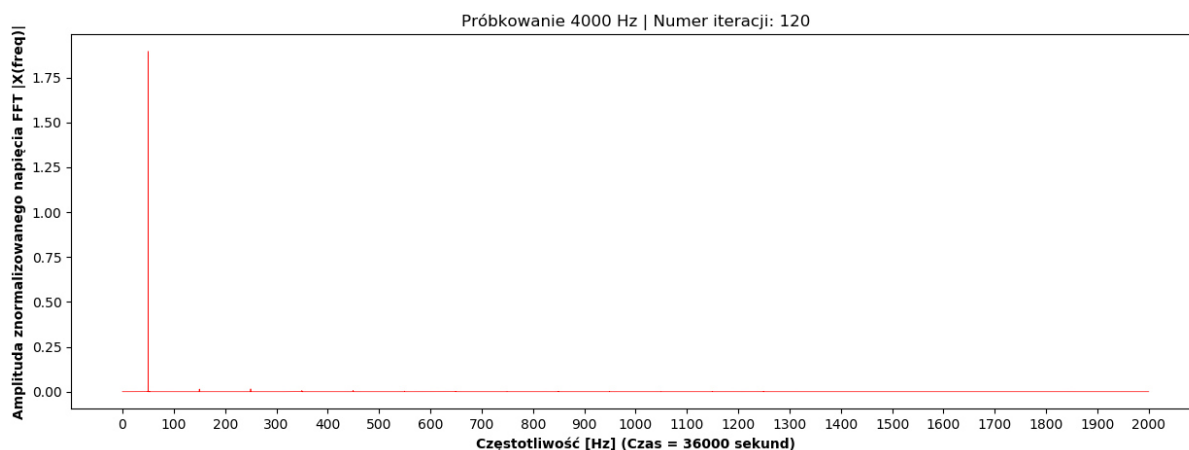
Po wykonaniu wszystkich iteracji pętli, do folderu `Ratio` zapisywane są wykresy napięcia i natężenia, przedstawiające procentowy stosunek harmonicznych do pierwszej harmonicznej, odpowiadającej częstotliwości 50Hz. Zawierają one w nazwie dokładną datę wyeksportowania pliku.

Do folderu `Final_Plots`, po przejściu ostatniej pętli iteracji, trafiają wykresy finałowe z wynikami obejmującymi całkowity okres badań. Folder ten zawiera wykresy harmoniczných, oraz obliczonych transformat FFT w skali liniowej oraz decybelowej.



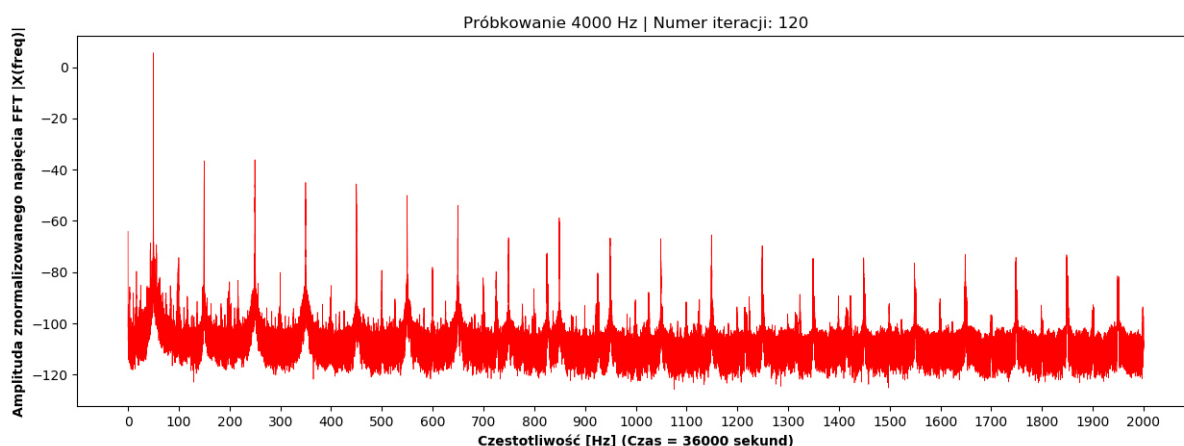
**Rys. 30** Struktura folderów zawierających wyniki pomiarów

Na rysunku 31 zaprezentowano przykładowy wynik badań sygnału napięcia w formie wykresu obliczonego widma częstotliwościowego w skali liniowej, o znormalizowanej energii sygnału, przy częstotliwości próbkowania 4000Hz, oraz 10 godzinnym okresie trwania badania.



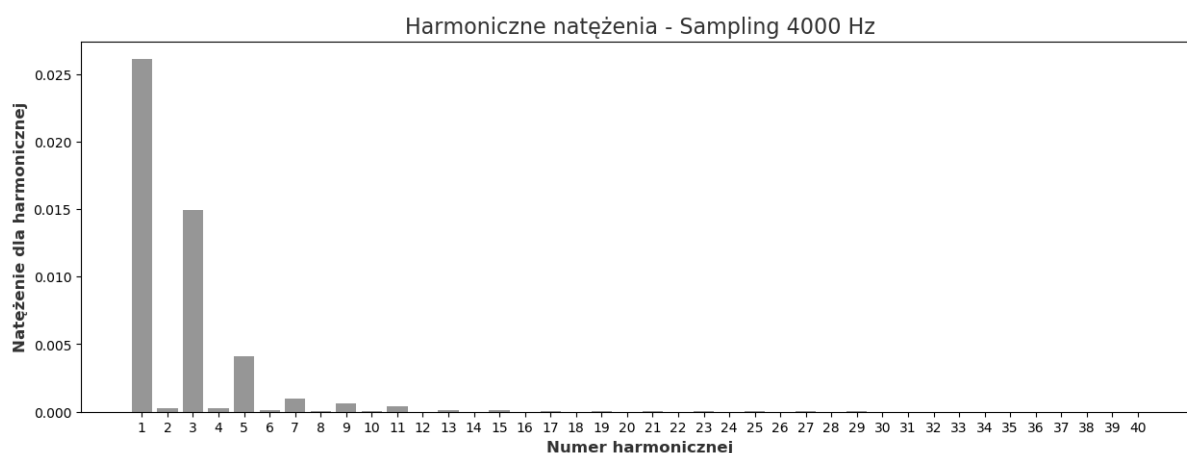
**Rys. 31 Przykładowy wykres FFT napięcia w skali liniowej**

W przypadku interpretacji wyników tego badania, skala liniowa nie nadaje się do wykorzystania, ponieważ występujące w sieci zakłócenia, oraz wartości amplitud wyższych harmoniczných (powyżej częstotliwości 50Hz), są na wykresie praktycznie niezauważalne. W celu poprawy czytelności wyświetlanych danych zaimplementowano do skryptu eksportowanie wyników także w formie uwzględniającej skalę decybelową, przedstawioną na rysunku 32. Po zastosowaniu skali logarytmicznej wyraźne widoczne są prążki reprezentujące kolejne częstotliwości harmoniczne wahające się od około 5dB, do około -90dB. Możemy również założyć że wartości amplitud widma o poziomie niższym (około -100Db) są szumem wynikającym z ograniczonej dokładności układu oraz przyrządów pomiarowych. Ciekawe zjawiska możemy zaobserwować również dla 0Hz - występujący przy tej wartości prążek ukazuje zawartość składowej stałej w badanej sieci energetycznej, a dodatkowe prążki dla częstotliwości około 725 Hz, 825 Hz oraz 925 Hz są wynikiem zniekształceń wprowadzanych do sieci przez nieliniowe odbiorniki prądu, podłączone do sieci energetycznej w mieszkaniu, w którym przeprowadzony został obrazowany pomiar.



**Rys. 32 Wykres FFT napięcia w skali decybelowej na podstawie wyników zaprezentowanych na rysunku numer 4**

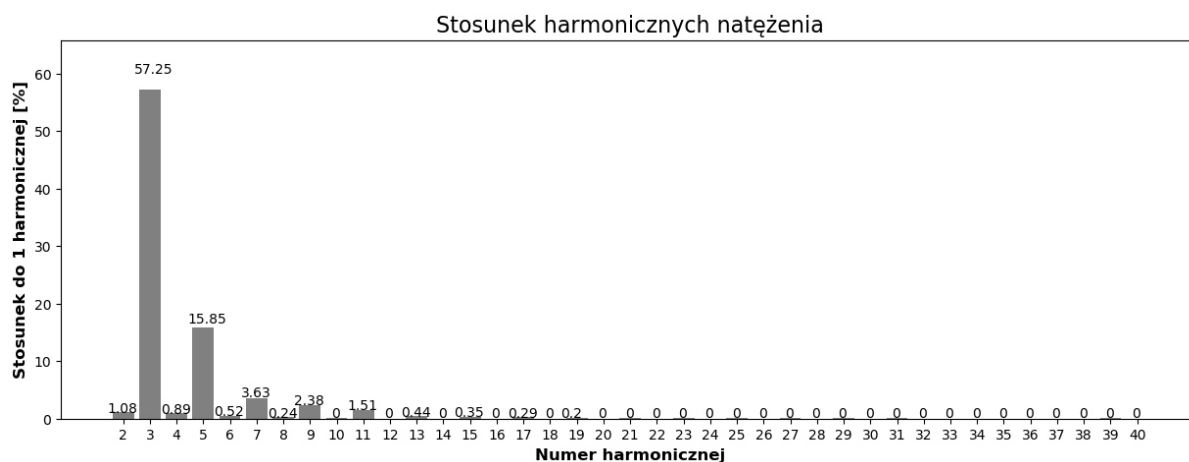
Kolejną formą wizualizacji wartości harmonicznych jest wykres słupkowy, który przedstawia dokładne pojedyncze wartości prążków widmowych, odpowiadającym od 1 do 40 harmonicznej badanego sygnału. Algorytm został zaprojektowany tak, aby z wektora zawierającego wszystkie zebrane próbki wybierał tylko te, reprezentujące wielokrotności częstotliwości 50Hz, uwzględniając przy tym możliwość zmiany przez użytkownika parametru częstotliwości próbkowania oraz czasu akwizycji sygnału.



**Rys. 33 Przykładowy wykres wartości poszczególnych harmonicznych natężenia w skali liniowej**

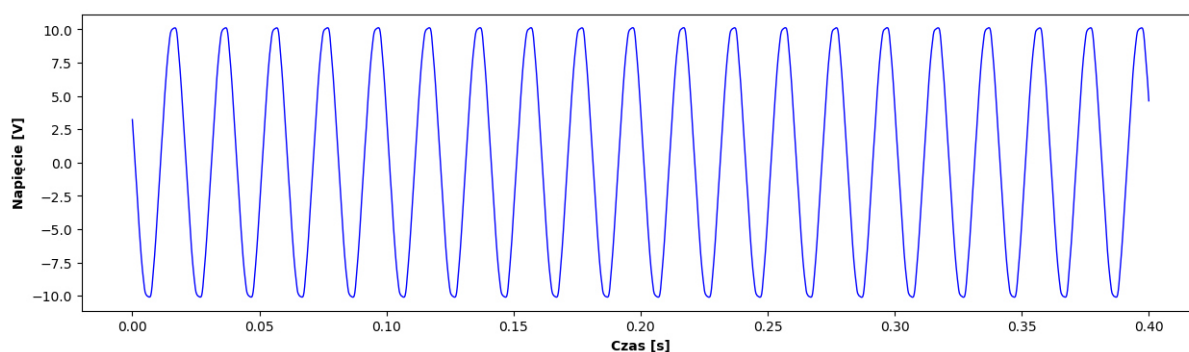
Głównym parametrem stosowanym do opisu jakości energii elektrycznej jest procentowy stosunek składowych harmonicznych do pierwszej podstawowej harmonicznej (50Hz), dlatego

kolejnym wykresem wyjściowym będzie czytelne przedstawienie tych wartości, wraz z dokładną wartością poszczególnych stosunków podawaną w procentach.

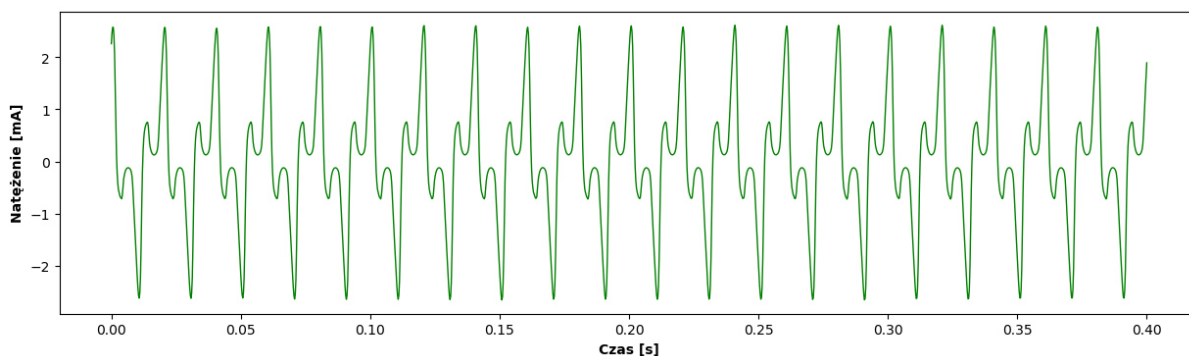


**Rys. 34 Wykres wartości poszczególnych harmonicznych natężenia w skali liniowej**

Ostatnimi zaprezentowanymi wykresami, są wykresy przebiegu amplitudy napięcia oraz natężenia badanego sygnału w dziedzinie czasu. Czas trwania pokazywanego wykresu ustalany jest przez użytkownika, poprzez wpisanie pożądanej wartości liczby okresów sygnału, w sekcji kodu odpowiedzialnej za definiowanie zmiennych. Przykładowe wyniki badań ukazano na rysunkach 35 i 36.

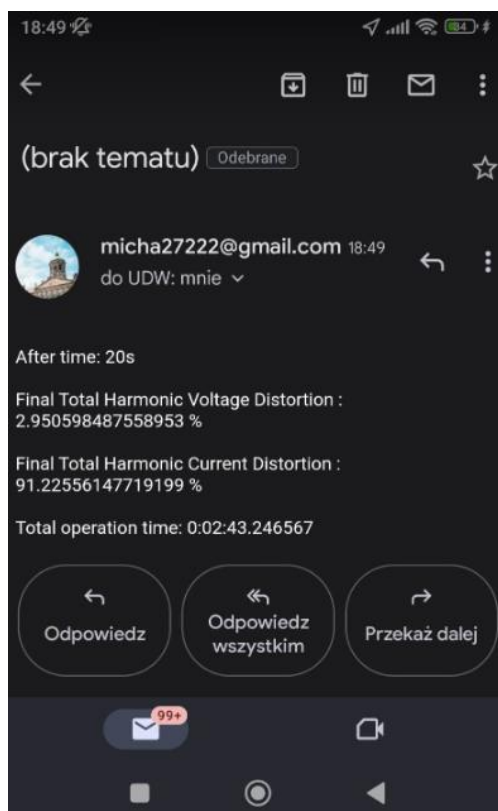


**Rys. 35 Przykładowy wykres dla pomiarów napięcia**



**Rys. 36 Przykładowy wykres dla pomiarów natężenia**

Ostatnią formą dostarczania wyników dla użytkownika jaką oferuje zaprojektowany system jest wysyłanie obliczonej, dla napięcia oraz natężenia, wartości współczynnika zawartości harmonicznych THD, omówionego w rozdziale 1. Skrypt wykorzystuje możliwości protokołu SMTP i po wpisaniu kodu autoryzacji, do skrzynki mailowej wysyła dane w formie tekstowej na podany e-mail. Przykładowa otrzymana wiadomość z systemu została ukazana na rysunku numer 10. Taka sama wiadomość tekstowa ukazuje się również na wyjściu terminala Python po ukończeniu ostatniej pętli iteracji.



**Rys. 37 Podgląd otrzymanej na maila wiadomości z obliczonymi wynikami THD**



## Podsumowanie

W ramach pracy zaprojektowano i wykonano interfejs pomiędzy siecią energetyczną a modulem oscyloskopu cyfrowego, uwzględniając możliwość wystąpienia niepożądanych zjawisk takich jak wyładowania atmosferyczne, lub awarie urządzeń sieciowych na linii pomiędzy dostawcą energii elektrycznej a odbiorcą. Dostosowano również systemowe środowisko pracy, za pomocą konfiguracji interfejsów sieciowych oraz instalacją niezbędnych do pracy bibliotek.

Aplikację użytkownika oparto na zaprojektowanym skrypcie w języku Python, który obsługuje połączenie pomiędzy platformą sterującą a oscyloskopem, oraz wdraża niezbędne funkcje odpowiedzialne za wstępne przygotowanie do obliczeń wektorów zawierających próbki badanego sygnału, oraz obliczanie wartości FFT oraz THD.

Program pozwala użytkownikowi dowolnie manipulować wartościami zmiennych odpowiedzialnych za czas akwizycji, bądź częstotliwość próbkowania badanego sygnału.

Struktura wizualizacji wyników oparta została na eksportowanych wykresach FFT w skali liniowej oraz decybelowej, wykresach słupkowych poszczególnych wartości harmonicznych, oraz ich procentowej wartości w stosunku do pierwszej harmonicznej. Użytkownik ma również podgląd badanego sygnału na wykresach amplitudowych wyrażonych w dziedzinie czasu. Jako dodatkową formę przekazywania użytkownikowi wyników badań, zaimplementowano obsługę serwera SMTP, pozwalającą na wysyłanie wyników obliczonych wartości THD w formie tekstowej na podaną skrzynkę mailową.

**Zaprojektowany system realizuje wszystkie założone cele, a wyniki dostarczane do użytkownika są w przejrzystej i przystępnej formie.**

W celu dalszego rozwoju systemu należy rozważyć przeprojektowanie interfejsu pomiędzy siecią energetyczną a modulem oscyloskopu cyfrowego, aby całość zamknąć w mniejszej, bardziej kompaktowej obudowie. Kolejnym krokiem aby udogodnić użytkownikowi wgląd w wykonanie pomiaru, mogłoby być zaimplementowanie obsługi serwera WWW, na który każdorazowo po wykonaniu pomiarów, trafiać będą wyniki badań aktualizowane w czasie rzeczywistym, umożliwiając tworzenie wykresów wartości THD w dziedzinie czasu. Rozbudowywana baza danych, przechowująca pomiary wykonywane w różnych miejscach, pozwoliła by na dogłębną analizę parametrów pracy sieci energetycznej.

## Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z 04.05.2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz. U. Nr 93, poz. 623, 2007
- [2] PN – EN 50160: 2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [3] Artykuł „Parametry opisujące jakość energii elektrycznej”, dr inż. Grzegorz Hołdyński, dr inż. Zbigniew Skibko, elektro.info 12/2014 <https://www.elektro.info.pl/artykul/jakosc-energii-elektrycznej/58819,parametry-opisujace-jakosc-energii-elektrycznej>
- [4] Artykuł „OCENA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECIACH PRZEMYSŁOWYCH”, dr inż. Edward Musiał <https://www.cire.pl/pliki/2/e-pismo-1-jakosc.pdf>
- [5] Artykuł „VOLTAGE & CURRENT UNBALANCE – A Primer”, Afrienergy, 1.11.2019 <http://afrienergyonline.com/voltage-current-unbalance-a-primer/>
- [6] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Transformacja\\_Fouriera](https://pl.wikipedia.org/wiki/Transformacja_Fouriera)
- [7] Artykuł „Fast Fourier Transformation FFT - Basics”, Nti-Audio <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>
- [8] Artykuł „Analiza widmowa dźwięku”, Sebastian Korczak, 22.07.2009 <https://myinventions.pl/index.php?page=AnalizaDzwieku>
- [9] Artykuł „Digital Communication – Sampling”, Tutorialspoint, 2018 [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_communication/digital\\_communication\\_sampling.htm#](https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_sampling.htm#)
- [10] Artykuł „Analiza częstotliwościowa”, Grzegorz Szwoch, Gdańsk, 2017-2018 <https://sound.eti.pg.gda.pl/~greg/dsp/01-AnalizaWidmowa.html>
- [11] Artykuł „Data Analysis - Signal Processing”, WaveMetrics <https://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis>
- [12] <https://kamami.pl/analizatory-logiczne-analog-discovery/560680-analog-discovery-2-410-321-edu-oferta-akademicka.html>
- [13] <https://digilent.com/shop/bnc-adapter-for-analog-discovery/>
- [14] [https://botland.com.pl/moduly-glowne-beaglebone/18621-beaglebone-black-5904422346355.html?cd=18298825138&ad=&kd=&gclid=Cj0KCQiA1sucBhDgARIsAFoytUsMSoDyHrdHbAnEou-hZk-IkwxrA8wnMxMmFN2IniylzIWWWeQmgM4aAsZhEALw\\_wcB](https://botland.com.pl/moduly-glowne-beaglebone/18621-beaglebone-black-5904422346355.html?cd=18298825138&ad=&kd=&gclid=Cj0KCQiA1sucBhDgARIsAFoytUsMSoDyHrdHbAnEou-hZk-IkwxrA8wnMxMmFN2IniylzIWWWeQmgM4aAsZhEALw_wcB)
- [15] <https://beagleboard.org/getting-started>
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/APT\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/APT_(software))
- [17] Artykuł „Managing Python packages the right way”, László Kiss Kollár <https://opensource.com/article/19/4/managing-python-packages>
- [18] [https://en.wikipedia.org/wiki/Domain\\_Name\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Domain_Name_System)
- [19] [https://digilent.com/reference/\\_media/waveforms\\_sdk\\_reference\\_manual.pdf](https://digilent.com/reference/_media/waveforms_sdk_reference_manual.pdf)

- [20] Artykuł “Co to jest API? Wszystko o interfejsie programowania aplikacji”  
Sebastian Zawadzki, 01.12.2020  
<https://smartbees.pl/blog/api>
- [21] ORPHANED, 2022  
<https://www.cygwin.com/packages/summary/libQt5ScriptTools5.html>
- [22] SPI Inc, 1997-2022  
<https://packages.debian.org/sid/libqt5quick5-gles>
- [23] Freedesktop, 7.5.2021  
<https://www.freedesktop.org/wiki/Software/xdg-utils/>
- [24] Libusb, 2012-2022  
<https://libusb.info/>
- [25] jaki-jezyk-programowania.pl, Marcin Lasota, 2017-2022  
<https://jaki-jezyk-programowania.pl/technologie/python/>
- [26] Python Software Foundation, 2001-2022  
<https://docs.python.org/3/library/ctypes.html>
- [27] Stowarzyszenia Polska Grupa Użytkowników Pythona, Grudzień 2003  
<https://pl.python.org/docs/lib/module-os.html>
- [28] Python Software Foundation, 2001-2022  
<https://docs.python.org/3/library/datetime.html>
- [29] Python Software Foundation, 2001-2022  
<https://docs.python.org/3/library/smtplib.html>
- [30] Artykuł „Wstęp do biblioteki NumPy w Python”, Analityk, 2022  
<https://analitik.edu.pl/python-numpy/>
- [31] Artykuł „Matplotlib”, Centrum Edukacji Obywatelskiej, 2014  
<https://python101.readthedocs.io/pl/latest/pylab/>