

AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA METROLOGII I ELEKTRONIKI

Praca dyplomowa magisterska

**Analiza właściwości miernika do pomiaru THD
sygnałów napięciowych**

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Wojciech Zieliński

Elektrotechnika

dr hab. inż. Ryszard Sroka, prof. AGH

Kraków, 17 maja 2018

Upředzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „ Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także upředzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchylające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....

podpis

Spis treści

| | |
|---|---|
| 1. Podstawowe definicje | 2 |
| 1.1. Sygnały i ich parametry | 2 |
| 1.1.1. Definicja sygnału okresowego | 2 |
| 1.1.2. Składowe harmoniczne | 2 |
| 1.1.3. Parametry sygnałów | 3 |
| 1.1.4. Przykłady standardowych sygnałów okresowych | 4 |
| 1.2. Transformata Fouriera | 4 |
| 1.2.1. Dyskretna transformata Fouriera | 4 |
| 1.2.2. Własności DFT | 5 |
| Symetria | 5 |
| Liniowość | 6 |
| Rozdzielczość DFT | 6 |
| Przeciek DFT | 7 |
| 1.2.3. Szybka transformata Fouriera | 8 |
| 1.3. Definicja THD | 8 |
| 1.3.1. Współczynnik zawartości harmonicznych | 8 |
| 1.3.2. Całkowity współczynnik odkształceń harmonicznych | 8 |
| 1.3.3. THD przykładowych sygnałów | 8 |
| 1.3.4. THD a jakość energii elektrycznej | 8 |
| 1.4. Przetwornik analogowo - cyfrowy | 8 |
| 1.4.1. Próbkowanie | 8 |
| 1.4.2. Kwantowanie | 8 |
| 1.4.3. Kodowanie | 8 |
| 1.5. Filtr antyaliasingowy | 8 |
| 1.5.1. Twierdzenie o próbkowaniu i definicja aliasingu | 8 |
| 1.5.2. Filtry aktywne | 8 |
| 1.5.3. Topologie filtrów aktywnych | 8 |
| 1.5.4. Filtry w technologii SC | 8 |
| 1.5.5. Dobór parametrów filtra | 8 |

| | |
|---|-----------|
| 2. Przegląd istniejących rozwiązań | 9 |
| 3. Analiza normy IEC 6100-4-30 | 10 |
| 3.1. Klasy przyrządów | 10 |
| 3.2. Struktura przyrządu | 10 |
| 3.3. Wymagania dotyczące pomiaru częstotliwości | 10 |
| 3.4. Wymagania dotyczące pomiaru harmonicznych | 10 |
| 4. Implementacja przyrządu | 11 |
| 4.1. Założenia projektowe | 11 |
| 4.2. Użyte podzespoły | 11 |
| 4.2.1. Płytki rozwojowa FRDM-KL25Z | 11 |
| 4.2.2. Filtr antyaliasingowy - układ MAX295 | 11 |
| 4.2.3. Pamięć zewnętrzna - układ 23LCV1024 | 11 |
| 4.2.4. Wyświetlacz OLED SSD1306 | 11 |
| 4.3. Projekt PCB | 11 |
| 4.3.1. Schemat | 12 |
| 4.3.2. Layout | 12 |
| 4.4. Środowisko pracy | 12 |
| 4.4.1. Środowisko mbed | 12 |
| 4.4.2. Skrypty testowe | 12 |
| 4.5. Program | 12 |
| 4.5.1. Algorytm ogólny | 12 |
| 4.5.2. Inicjalizacja | 12 |
| 4.5.3. Pomiar częstotliwości | 12 |
| 4.5.4. Próbkowanie | 12 |
| 4.5.5. DFT i wyznaczenie THD | 12 |
| 4.5.6. Prezentacja wyników | 12 |
| 5. Badanie parametrów przyrządu | 13 |
| 5.1. Symulacje | 13 |
| 5.1.1. Wpływ rozdzielczości przetwornika A/C na wynik pomiaru | 13 |
| 5.1.2. Wpływ precyzji częstotliwości próbkowania na wynik pomiaru | 13 |
| 5.2. Pomiary | 13 |
| 5.2.1. Badanie filtra antyaliasingowego | 13 |
| 5.2.2. Wpływ funkcji okna na wynik pomiaru | 13 |
| 5.2.3. Wpływ uśredniania na wynik pomiaru | 13 |
| 5.2.4. Porównanie z rozwiązaniami komercyjnymi | 13 |
| 6. Podsumowanie i wnioski | 14 |

| | |
|---------------------------|----|
| Bibliografia | 16 |
|---------------------------|----|

1. Podstawowe definicje

1.1. Sygnały i ich parametry

1.1.1. Definicja sygnału okresowego

Sygnałem nazywa się zmienność danej wielkości fizycznej w funkcji jednej lub wielu zmiennych. W pomiarach elektrycznych najczęściej obserwujemy zmienność napięcia, natężenia, bądź częstotliwości w funkcji czasu. Każdy sygnał posiada nośnik oraz niesie jakąś informację. Przykładem nośnika może być przemienne napięcie elektryczne, zaś informacją przez niego niesioną może być zmiana amplitudy lub częstotliwości tego napięcia.

Jeśli dany sygnał można zamodelować funkcją $f(t) = f(t + kT)$, gdzie k jest liczbą naturalną, to jest on nazywany sygnałem okresowym o okresie T oraz częstotliwości $f = \frac{1}{T}$. [?] Najprostszym przykładem sygnału okresowego jest sygnał sinusoidalny $f(t) = \sin(2\pi f \cdot t)$.

1.1.2. Składowe harmoniczne

Jeżeli sygnał okresowy przedstawiany jest funkcją, która spełnia warunki Dirichleta, to znaczy:

- w dowolnym przedziale czasu równym okresowi posiada skończoną liczbę minimów i maksimów lokalnych,
- w tym przedziale czasu jest ciągła, z wyjątkiem skończonej liczby punktów nieciągłości, w których istnieją jej prawo- i lewostronne granice,
- wartości funkcji w punktach nieciągłości są równe wartościom średniej arytmetycznej granic prawo- i lewostronnych w tych punktach,

to można go przedstawić za pomocą szeregu trygonometrycznego Fouriera(1): [?]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

gdzie:

A_0 – składowa stała,

$\omega = 2\pi f$ – pulsacja podstawowej harmonicznej,

A_n – amplituda n-tej harmonicznej,

φ_n – faza n-tej harmonicznej.

Wartość amplitud harmonicznych w funkcji częstotliwości nazywamy widmem sygnału. Prezentacja sygnału w funkcji częstotliwości jest równoważna z prezentacją jej w funkcji czasu.

1.1.3. Parametry sygnałów

W opisie sygnałów okresowych można wyróżnić kilka ich podstawowych wartości [ŁsaczaTelekomunikacyjne]:

- wartość chwilową (w chwili czasu τ)

$$F_\tau = f(\tau) \quad (2)$$

- wartość szczytową

$$F_m = \sup_{t \in [t_0, t_0 + T]} f(t) \quad (3)$$

- wartość średnią

$$F_{sr} = A_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (4)$$

Jeśli $A_0 = 0$, to sygnał nazywamy przemiennym;

- wartość skuteczną (RMS)

$$F_{sk} = F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt} \quad (5)$$

Wykorzystując powyższe wartości wprowadzono szereg współczynników ułatwiających ocenę parametrów sygnału. Najważniejsze z nich to:

- współczynnik kształtu

$$k_k = \frac{F}{F_{sr}} \quad (6)$$

- współczynnik szczytu

$$k_s = \frac{F_m}{F} \quad (7)$$

- współczynnik wypełnienia

$$k_w = \frac{F_{sr}}{F_m} \quad (8)$$

Współczynniki najważniejszych sygnałów są stabelaryzowane, można więc na ich podstawie np. wyznaczyć wartość skuteczną i maksymalną danego sygnału znając jego kształt i wartość średnią.

1.1.4. Przykłady standardowych sygnałów okresowych

1.2. Transformata Fouriera

1.2.1. Dyskretna transformata Fouriera

Transformata Fouriera jest niezwykle istotnym narzędziem matematycznym, pozwalającym na analizę częstotliwościową sygnałów. Dla sygnałów ciągłych przyjmuje ona postać następującej całki:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (9)$$

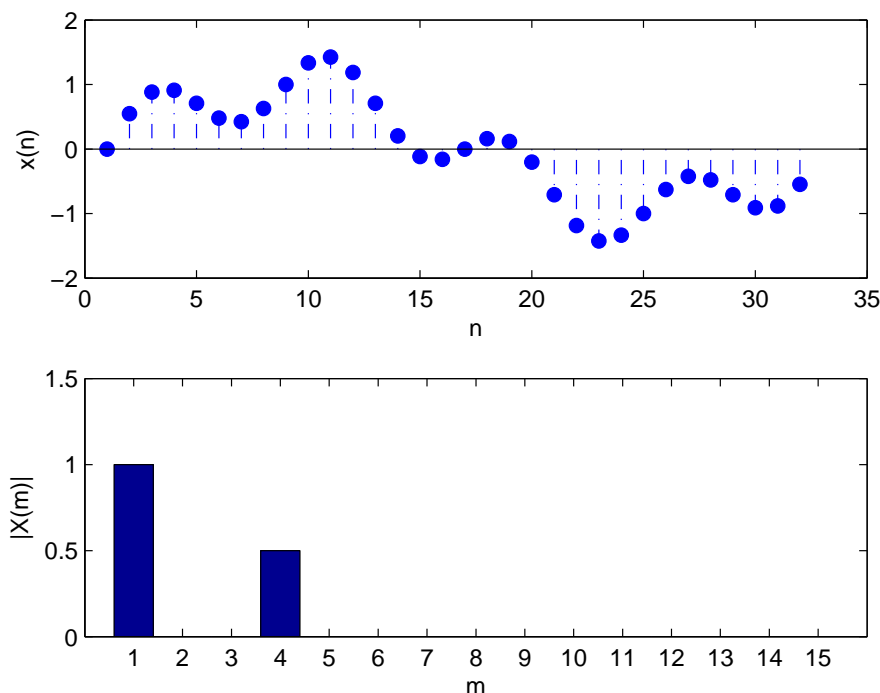
gdzie $x(t)$ jest sygnałem ciągłym w dziedzinie czasu. Przekształcenie to umożliwia przejście ciągłej w dziedzinie czasu funkcji $x(t)$ w ciągłą w dziedzinie częstotliwości funkcję $X(f)$, przy czym obie z nich są równoważnym opisem tego samego sygnału.

Jeśli sygnał $x(t)$ zostanie spróbkowany równomiernie w dziedzinie czasu, można go poddać dyskretnemu przekształceniu Fouriera: [?]

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{nm}{N}} \quad (10)$$

gdzie $x(n)$ jest ciągiem próbek sygnału $x(t)$. Równanie (10) może w bardzo prosty sposób zostać numerycznie zaimplementowane na dowolnym procesorze, co umożliwia błyskawiczną analizę częstotliwościową dowolnego sygnału.

Na wykresie (Rys. 1) przedstawiono przykładowy sygnał spróbkowany w dziedzinie czasu oraz jego widmo częstotliwościowe otrzymane z DFT.



Rys. 1. Spróbkowany sygnał ciągły oraz jego widmo częstotliwościowe

1.2.2. Własności DFT

Dyskretna transformata Fouriera posiada kilka istotnych własności i zagadnień, o których należy tutaj wspomnieć. Są to:

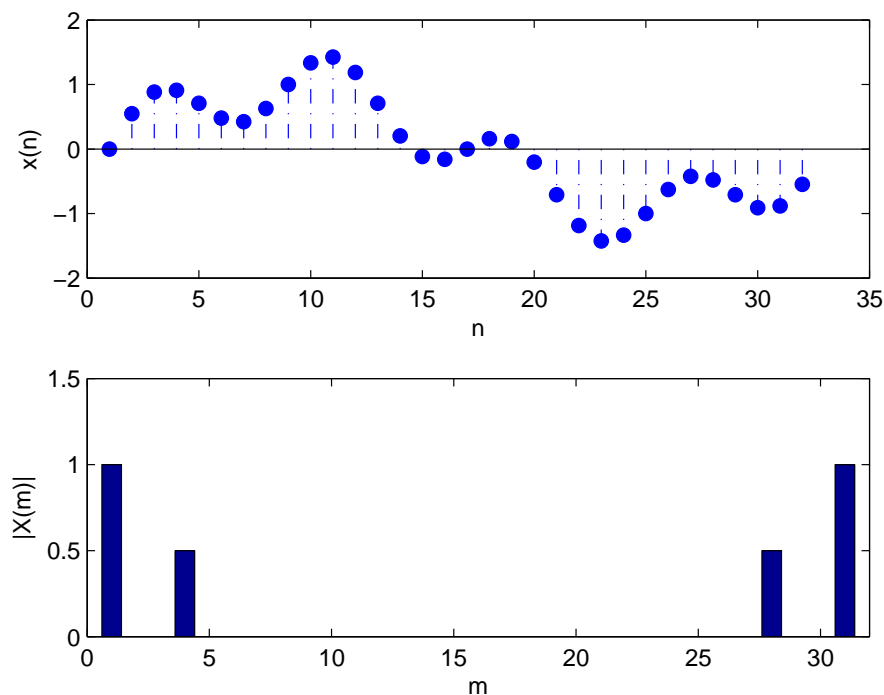
- symetria,
- liniowość,
- rozdzielczość,
- przeciek.

Symetria

Jeśli $x(n)$ jest ciągiem rzeczywistym (jego części urojone są równe zero) o liczbie elementów równej N to dla wartości wyjściowej jego DFT zachodzi zależność:

$$|X(m)| = |X(N - m)| \quad (11)$$

Oznacza to, że widmo częstotliwościowe jest symetryczne względem jego środka, czyli względem połowy częstotliwości próbkowania sygnału (patrz: [Rozdzielczość DFT](#)). W związku z tym wartości dla argumentów $m \geq (N/2)$ są nadmiarowe w stosunku do wartości dla argumentów od $m = 0$ do $m = (N/2) - 1$ i nie wnoszą żadnych dodatkowych informacji. Na rys. 2 przedstawiono pełne widmo sygnału z rys. 1.



Rys. 2. Symetria DFT. Prążki dla $m = 28$ i 31 są kopią prążków dla $m = 1$ i 4 .

Liniowość

Liniowość jest własnością DFT, która mówi, że DFT sumy dwóch sygnałów jest równa sumie transformat każdego z nich [?], to znaczy transformata sygnału $x_{sum}(n) = x_1(n) + x_2(n)$ jest równa $X_{sum}(m) = X_1(m) + X_2(m)$. Dzięki tej własności możliwe jest wyznaczanie DFT sygnału składającego się z sumy dowolnej liczby sinusoid.

Rozdzielczość DFT

Aby wyznaczyć rzeczywistą wartość częstotliwości dla danego prążka DFT należy posłużyć się wzorem:

$$f(m) = \frac{mf_s}{N} \quad (12)$$

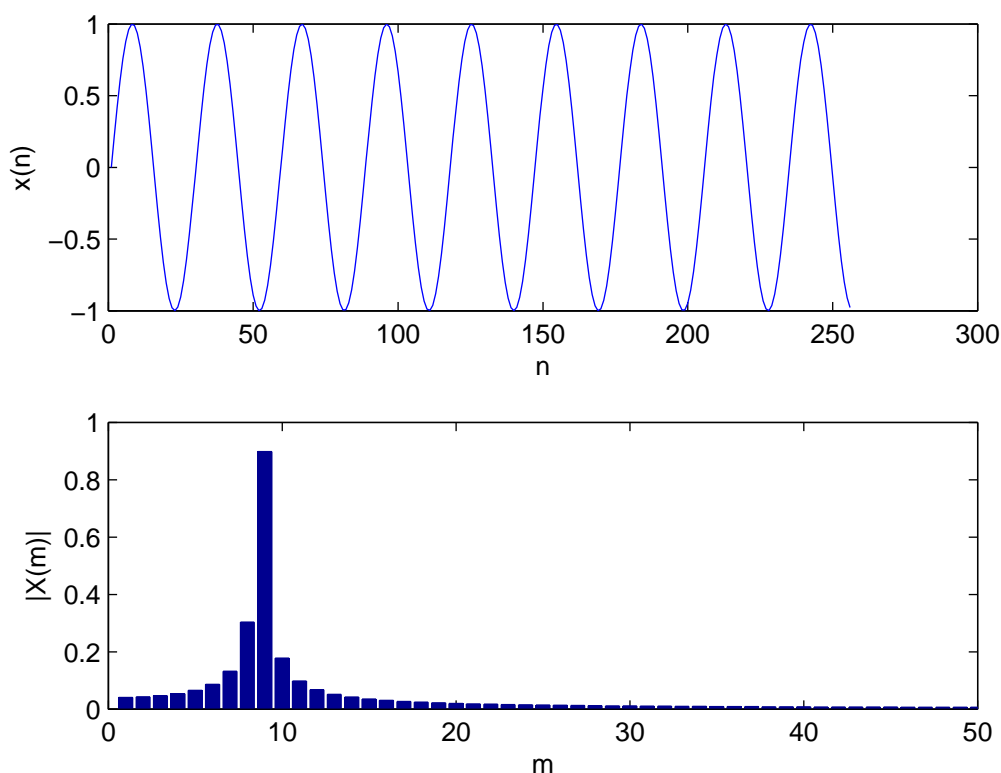
gdzie f_s to częstotliwość próbkowania, a N to liczba próbek. Zatem rozdzielczość DFT, czyli dokładność z jaką możemy zbadać widmo sygnału wynosi

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (13)$$

Wynika stąd, że chcąc poprawić dokładność analizy częstotliwościowej powinniśmy zwiększyć liczbę pobieranych próbek. Niestety, prowadzi to do wzrostu zużycia pamięci i znacznego wydłużenia czasu obliczeń, niezbędne jest więc znalezienie złotego środka między rozdzielczością a możliwościami sprzętu.

Przeciek DFT

Dyskretna transformata Fouriera operuje na skończonych zbiorach N wartości wejściowych, próbkowanych z częstotliwością f_s , dając w wyniku N -punktową transformatę, której dyskretne wartości wyjściowe są związane z całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości $\frac{f_s}{N}$. Jeśli jednak sygnał wejściowy zawiera składową o częstotliwości będącej niecałkowitą wielokrotnością $\frac{f_s}{N}$, to energia tej składowej ujawni się we wszystkich prążkach DFT[?]. To niekorzystne zjawisko nazywane jest przeciekiem DFT i prowadzi do przekłamania wyników analizy częstotliwościowej.



Rys. 3. Prezentacja zjawiska przecieku DFT

Ponieważ w przyrodzie nie istnieją sygnały czysto poliharmoniczne, zjawisko przecieku jest nieuniknione. Można je jednak minimalizować poprzez dostosowywanie częstotliwości próbkowania do podstawowej składowej sygnału oraz wykorzystywanie funkcji okien, które niwelują przeciek przez zmniejszanie amplitudy sygnału przy jego brzegach.

1.2.3. Szybka transformata Fouriera

1.3. Definicja THD

1.3.1. Współczynnik zawartości harmonicznych

1.3.2. Całkowity współczynnik odkształceń harmonicznych

1.3.3. THD przykładowych sygnałów

1.3.4. THD a jakość energii elektrycznej

1.4. Przetwornik analogowo - cyfrowy

1.4.1. Próbkowanie

1.4.2. Kwantowanie

1.4.3. Kodowanie

1.5. Filtr antyaliasingowy

1.5.1. Twierdzenie o próbkowaniu i definicja aliasingu

1.5.2. Filtry aktywne

1.5.3. Topologie filtrów aktywnych

1.5.4. Filtry w technologii SC

1.5.5. Dobór parametrów filtra

2. Przegląd istniejących rozwiązań

3. Analiza normy IEC 6100-4-30

3.1. Klasy przyrządów

3.2. Struktura przyrządu

3.3. Wymagania dotyczące pomiaru częstotliwości

3.4. Wymagania dotyczące pomiaru harmonicznych

4. Implementacja przyrządu

4.1. Założenia projektowe

4.2. Użyte podzespoły

4.2.1. Płytką rozwojowa FRDM-KL25Z

4.2.2. Filtr antyaliasingowy - układ MAX295

4.2.3. Pamięć zewnętrzna - układ 23LCV1024

4.2.4. Wyświetlacz OLED SSD1306

4.3. Projekt PCB

Pamięć RAM oraz obwody filtra antyaliasingowego zostały umieszczone na specjalnie zaprojektowanej płytce PCB. Do przygotowania projektu wykorzystano program Altium Designer, zaś samą płytkę wykonano metodą termotransferu i wytrawiono w nadsiarczanie miedzi.

4.3.1. Schemat

4.3.2. Layout

4.4. Środowisko pracy

4.4.1. Środowisko mbed

4.4.2. Skrypty testowe

4.5. Program

4.5.1. Algorytm ogólny

4.5.2. Inicjalizacja

4.5.3. Pomiar częstotliwości

4.5.4. Próbkowanie

4.5.5. DFT i wyznaczenie THD

4.5.6. Prezentacja wyników

5. Badanie parametrów przyrządu

5.1. Symulacje

5.1.1. Wpływ rozdzielczości przetwornika A/C na wynik pomiaru

5.1.2. Wpływ precyzji częstotliwości próbkowania na wynik pomiaru

5.2. Pomiary

5.2.1. Badanie filtra antyaliasingowego

5.2.2. Wpływ funkcji okna na wynik pomiaru

5.2.3. Wpływ uśredniania na wynik pomiaru

5.2.4. Porównanie z rozwiązaniami komercyjnymi

6. Podsumowanie i wnioski

Załącznik A - Szczegółowe wyniki pomiarów

Załącznik B - Pliki nagłówkowe klas programu

Bibliografia

- [1] Sroka and Zatorski, *Podstawy metrologii elektrycznej*. Wydawnictwa AGH, 2011.
- [2] Lyons, *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010.
- [3] Sroka and Zatorski, *Pomiary w telekomunikacyjnych łączach analogowo-analogowych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo - Dydaktyczne AGH, 2004.
- [4] Bień, *Metrologia jakości energii elektrycznej w obszarze niskoczęstotliwościowych zaburzeń napięcia sieci*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo - Dydaktyczne AGH, 2003.
- [5] Bień, Chmielowiec, Firlit, Hanzelka, Kołek, Piątek, Rogóż, and Woźny, "Piknik jakości energii elektrycznej - raport z eksperymentu pomiarowego," 2015.
- [6] Chwaleba, Poniński, and Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, 2014.
- [7] M. Integrated. (2010) Max295 datasheet. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX291-MAX296.pdf>
- [8] Microchip. (2012) 23lcv1024 datasheet. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25156A.pdf>
- [9] Doliński, "Warto spróbować, część 1," *Elektronika Praktyczna*, 9/2006.
- [10] —, "Warto spróbować, część 2," *Elektronika Praktyczna*, 10/2006.
- [11] "Pn-en 61000-4-7:2002," 2002.
- [12] "Iec 61000-4-30:2015," 2015.