

# Laboratorium Podstaw Cyfrowej Automatyki Elektroenergetycznej

## Wykaz ćwiczeń

### *Elektrotechnika – wymiar 1L*

1. Projektowanie i badanie właściwości filtrów rekursywnych.
2. Badanie właściwości filtrów nierekursywnych.
3. Algorytmy pomiaru amplitudy sygnału sinusoidalnego.
4. Algorytmy pomiaru mocy czynnej i biernej.
5. Cyfrowy pomiar częstotliwości.
6. Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do realizacji wybranych funkcji cyfrowej automatyki elektroenergetycznej – Realizacja członu pomiarowego zabezpieczenia z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej.

## Ćwiczenie 1 – Projektowanie i badanie właściwości filtrów rekursywnych

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Wyznaczyć transmitancję cyfrowego filtra rekursywnego:
  - bazując na wzorcowej transmitancji „nr grupy”,
  - częstotliwości próbkowania  $f_p = (900 + (\text{nr grupy}) * 100)$  Hz,
  - dolnoprzepustowy (DP) – grupy nieparzyste; górnoprzepustowy (GP) – grupy parzyste,
  - częstotliwość graniczna projektowanego filtra cyfrowego  $f_{gc} = (200 + (\text{nr grupy}) * 50)$  Hz.

**Uwaga!** Przyjmując że częstotliwość graniczna, to taka częstotliwość, przy której wzmocnienie filtra spada do wartości  $-3\text{dB}$ .

2. Wykorzystując Matlab'a zdjąć charakterystykę częstotliwościową otrzymanego filtra (ocenić czy uzyskany filtr odpowiada powyższym założeniom projektowym), zbadać odpowiedzi czasowe dla różnych sygnałów wejściowych (przeprowadzić analizę widmową sygnałów przed filtracją oraz po filtracji).

### Projektowanie filtrów NOI wg zależności:

$$DP: \quad G(z) = G(s) \Big|_{s \rightarrow A \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}, \quad A = \omega_{ga} \operatorname{ctg}(\omega_{gc} T_p / 2)$$

$$GP: \quad G(z) = G(s) \Big|_{s \rightarrow B \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}}, \quad B = \omega_{ga} \operatorname{tg}(\omega_{gc} T_p / 2)$$

### Transmitancje filtrów wzorcowych:

1. Butterworth 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$
2. Bessel 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + 1.73s + 1}$
3. Tschebyschev I, 2nd order  $G(s) = \frac{1.43}{s^2 + 1.4256s + 1.5162}$
4. Butterworth 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$
5. Bessel 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + 1.73s + 1}$
6. Tschebyschev I, 2nd order  $G(s) = \frac{1.43}{s^2 + 1.4256s + 1.5162}$
7. Butterworth 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$
8. Bessel 2nd order  $G(s) = \frac{1}{s^2 + 1.73s + 1}$
9. Tschebyschev I, 2nd order  $G(s) = \frac{1.43}{s^2 + 1.4256s + 1.5162}$

## Ćwiczenie 2 – Badanie właściwości filtrów nierekursywnych

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zaprojektować cyfrowy filtr nierekursywny:
  - o oknie będącym A, „nr grupy” oraz B1 (grupa nieparzysta)/B2 (grupa parzysta) ,
  - pracujący przy częstotliwości próbkowania  $f_p=(900+(nr\ grupy)*100)$  Hz,
  - przyjmując że częstotliwość składowej podstawowej wynosi 50 Hz.
2. Wykorzystując Matlab'a zdjąć charakterystykę częstotliwościową otrzymanego filtru, zbadać odpowiedzi czasowe dla różnych sygnałów wejściowych (przeprowadzić analizę widmową sygnałów przed filtracją oraz po filtracji). Przy wyborze częstotliwości sygnałów wejściowych uwzględnić kształt uzyskanej charakterystyki częstotliwościowej otrzymanego filtra.
3. Zrealizować filtrację implementując w środowisku Matlab równanie różnicowe uzyskanego filtru.

### A. Okna standardowych filtrów nierekursywnych:

- A1. Funkcja Walsh'a zerowego rzędu (pełnookresowa).
- A2. Funkcja Walsh'a pierwszego rzędu (pełnookresowa).
- A3. Funkcja Walsh'a drugiego rzędu (pełnookresowa).
- A4. Okno sinusoidalne (pełnookresowe).
- A5. Okno sinusoidalne (półokresowe).
- A6. Okno cosinusoidalne (pełnookresowe).
- A7. Okno cosinusoidalne (półokresowe).
- A8. Okno sinusoidalne (dwukresowe).
- A9. Okno cosinusoidalne (dwukresowe).

### B. Niestandardowe okna filtrów nierekursywnych:

- B1. Funkcja trójkątna (pełnookresowa).
- B2. Funkcja trapezoidalna (pełnookresowa).

## Ćwiczenie 2b (dodatkowe) – Projektowanie i badanie właściwości filtrów nierekursywnych

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zaprojektować poprzez dyskretyzację założonej charakterystyki częstotliwościowej cyfrowy filtr nierekursywny o następujących właściwościach:
  - filtr dolnoprzepustowy,
  - częstotliwość próbkowania  $f_p = (900 + (\text{nr grupy}) \cdot 100)$  Hz,
  - częstotliwości graniczna  $f_g = (200 + (\text{nr grupy}) \cdot 50)$  Hz.
  - przyjąć idealny, prostokątny kształt charakterystyki częstotliwościowej,
  - rozważyć dwa warianty długości okien:  $N=11$ , oraz  $N=21$ ,
  - współczynniki filtra wyznaczyć analitycznie oraz wykorzystując Matlab'a (*fft*)
2. Wykorzystując Matlab'a zdjąć charakterystykę częstotliwościową otrzymanego filtru, zbadać odpowiedzi czasowe dla różnych sygnałów wejściowych (przeprowadzić analizę widmową sygnałów przed filtracją oraz po filtracji). Przy wyborze częstotliwości sygnałów wejściowych uwzględnić kształt uzyskanej charakterystyki częstotliwościowej otrzymanego filtra.
3. Zastosować do filtra uzyskanego w punkcie 1 wybrane okna wygładzające (Hamming, Hanning, Blackman) oraz przeprowadzić badania jak w punkcie 2.
4. Zrealizować filtrację implementując w środowisku Matlab równanie różnicowe uzyskanego filtru.
5. Bazując na filtrze o oknie uzyskanym w punkcie 3 wyznaczyć współczynniki filtrów górnoprzepustowych oraz środkowoprzepustowych. Do transformacji wykorzystać poniższe wzory.

Przekształcenie do filtra górnoprzepustowego:

$$f_{gGP} = f_p / 2 - f_{gDP}; \quad h_{GP}(m) = (-1)^m \cdot h_{DP}(m).$$

Przekształcenie do filtra środkowoprzepustowego:

$$f_{g1SP} = f_0 - f_{gDP}; \quad f_{g2SP} = f_0 + f_{gDP}; \quad h_{SP}(m) = \cos(2 \cdot \pi \cdot m \cdot f_0) \cdot h_{DP}(m);$$

## Ćwiczenie 3 – Algorytmy pomiaru amplitudy sygnału sinusoidalnego

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zbadać właściwości następujących algorytmów pomiarowych:

$$X_{amp}(n) = \frac{2}{m} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2N_1} \right)^{mN_1/2-1} \sum_{k=0}^{mN_1/2-1} |x(n-k)| \quad (1a)$$

$$X_{amp}(n) = \sqrt{\frac{2}{N_1} \sum_{k=0}^{N_1-1} x^2(n-k)} \quad (2a)$$

$$X_{amp}(n) = \sqrt{x_c^2(n) + x_s^2(n)} \quad (1b)$$

$$X_{amp}(n) = \sqrt{\frac{x_c(n) \cdot x_c(n-k) + x_s(n) \cdot x_s(n-k)}{\cos(k\Omega_1)}} \quad (2b)$$

$$X_{amp}(n) = \sqrt{\frac{x_s(n) \cdot x_c(n-k) - x_c(n) \cdot x_s(n-k)}{\sin(k\Omega_1)}} \quad (3b)$$

$$X_{amp}(n) = \sqrt{\frac{x(n-k) \cdot x(n-m) - x(n) \cdot x(n-k-m)}{\sin(k\Omega_1) \cdot \sin(m\Omega_1)}} \quad (4b)$$

gdzie:  $x$  – sygnał wejściowy;  $N_1$  – liczba próbek przypadających na jeden okres składowej podstawowej;  $m$  – liczba uśrednianych półokresów (zmieniać w zakresie od 1 do 4);  $\Omega_1$  – pulsacja względna równa  $2\pi/N_1$ ;  $k$  – opóźnienie;  $m$  – drugie opóźnienie.

Do wyznaczenia składowych ortogonalnych ( $x_s$ ,  $x_c$ ) wykorzystać:

a) ortogonalizację przez opóźnienie

$$x_c(n) = x(n)$$

grupy parzyste 
$$x_s(n) = \frac{x(n-k) - x(n) \cdot \cos(k\Omega_1)}{\sin(k\Omega_1)} \quad (1)$$

$$x_c(n) = x(n-k)$$

grupy nieparzyste 
$$x_s(n) = \frac{x(n-2k) - x(n)}{2\sin(k\Omega_1)} \quad (2)$$

b) cyfrowe filtry ortogonalne: pary filtrów  $\sin$  oraz  $\cos$  (grupy parzyste) lub filtrów o oknach Walsh'a pierwszego i drugiego rzędu (grupy nieparzyste).

– przyjąć że częstotliwość składowej podstawowej wynosi 50 Hz.

– przyjąć częstotliwości próbkowania  $f_p = (900 + (nr \text{ grupy}) \cdot 100)$  Hz.

2. Dla zadanych algorytmów (patrz poniżej – Badane algorytmy):

a) Określić dynamikę i dokładność pomiaru dla sygnału niezakłóconego.

b) Zbadać jakość pomiaru przy zakłóceniu sygnału składową nieokresową o stałej czasowej zanikania z zakresu 50 – 500 ms.

c) Zbadać wpływ innych zakłóceń harmonicznnych i nieharmonicznnych na jakość pomiaru.

d) Zbadać wpływ odchyłek częstotliwości na dokładność pomiaru w zakresie  $\pm 2$  Hz wokół częstotliwości nominalnej.

- e) Ocenic wpływ częstotliwosci próbkowania na dokladnosc pomiaru amplitudy.
- f) Wyznaczc ekstremalne błędy pomiaru amplitudy w funkcji fazy sygnału (w obrębie jednego okresu próbkowania).
- g) Dokonac pomiaru amplitudy dla wybranych sygnałów uzyskanych z symulacji w programie EMTP-ATP.

**Badane algorytmy:** Gr.1-(1a) i (1b); Gr.2-(1a) i (2b); Gr.3-(1a) i (3b); Gr.4-(1a) i (4b); Gr.5-(2a) i (1b); Gr.6-(2a) i (2b); Gr.7-(2a) i (3b); Gr.8-(2a) i (4b); Gr.9-(2a) i (1b).

## Ćwiczenie 4 – Algorytmy pomiaru mocy czynnej i biernej

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zbadać właściwości następujących algorytmów pomiarowych:

$$\begin{aligned}
 P(n) &= \frac{1}{N_1} \sum_{k=0}^{N_1-1} u(n-k) \cdot i(n-k) \\
 Q(n) &= \frac{1}{N_1} \sum_{k=0}^{N_1-1} u(n-k - N_1/4) \cdot i(n-k) \\
 Q(n) &= -\frac{1}{N_1} \sum_{k=0}^{N_1-1} u(n-k) \cdot i(n-k - N_1/4)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 P(n) &= \frac{1}{2} [u_c(n) \cdot i_c(n) + u_s(n) \cdot i_s(n)] \\
 Q(n) &= \frac{1}{2} [u_s(n) \cdot i_c(n) - u_c(n) \cdot i_s(n)]
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 P(n) &= \frac{1}{2 \cos(k\Omega_1)} [u_s(n) \cdot i_s(n-k) + u_c(n-k) \cdot i_c(n)] \\
 Q(n) &= \frac{1}{2 \cos(k\Omega_1)} [u_s(n) \cdot i_c(n-k) - u_c(n-k) \cdot i_s(n)]
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 P(n) &= \frac{1}{2 \sin(k\Omega_1)} [u_s(n) \cdot i_c(n-k) - u_s(n-k) \cdot i_c(n)] \\
 Q(n) &= \frac{1}{2 \sin(k\Omega_1)} [u(n-k) \cdot i(n) - u(n) \cdot i(n-k)]
 \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:  $u, i$  – wartości chwilowe dostępnych sygnałów napięciowych i prądowych;  $N_1$  – liczba próbek przypadających na jeden okres składowej podstawowej;  $\Omega_1$  – pulsacja względna równa  $2\pi/N_1$ ;  $k$  – opóźnienie.

Do wyznaczenia składowych ortogonalnych ( $u_s, u_c, i_s, i_c$ ) wykorzystać:

a) ortogonalizację przez opóźnienie

$$\begin{aligned}
 x_c(n) &= x(n) \\
 \text{grupy parzyste} \quad x_s(n) &= \frac{x(n-k) - x(n) \cdot \cos(k\Omega_1)}{\sin(k\Omega_1)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 x_c(n) &= x(n-k) \\
 \text{grupy nieparzyste} \quad x_s(n) &= \frac{x(n-2k) - x(n)}{2 \sin(k\Omega_1)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

b) cyfrowe filtry ortogonalne: pary filtrów  $\sin$  oraz  $\cos$  (grupy parzyste) lub filtrów o oknach Walsh'a pierwszego i drugiego rzędu (grupy nieparzyste).

- przyjmując że częstotliwość składowej podstawowej wynosi 50 Hz.
- przyjmując częstotliwości próbkowania  $f_p = (900 + nr \text{ grupy}) \cdot 100$  Hz.

2. Dla zadanych algorytmów (patrz poniżej – Badane algorytmy):

a) Określić dynamikę i dokładność pomiaru dla sygnałów niezakłóconych (prądu oraz napięcia).

- b) Zbadać jakość pomiaru przy zakłóceniu sygnału składową nieokresową o stałej czasowej zanikania z zakresu 50 – 500 ms (uwzględnić jej obecność tylko w sygnale prądowym).
- c) Zbadać wpływ innych zakłóceń harmoniczných (w prądzie i/lub napięciu) na jakość pomiaru.
- d) Zbadać wpływ odchyleń częstotliwości na dokładność pomiaru w zakresie  $\pm 2$  Hz wokół częstotliwości nominalnej.
- e) Ocenic wpływ częstotliwości próbkowania na dokładność pomiaru mocy czynnej oraz biernej.
- f) Dokonać pomiaru mocy dla wybranych sygnałów uzyskanych z symulacji w programie EMTP-ATP.

**Badane algorytmy:** Gr.1-(1) i (2); Gr.2-(2) i (3); Gr.3-(3) i (4); Gr.4-(1) i (3); Gr.5-(1) i (4); Gr.6-(2) i (4); Gr.7-(1) i (2); Gr.8-(2) i (3); Gr.9-(3) i (4).



## Ćwiczenie 5 – Cyfrowy pomiar częstotliwości

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zbadać właściwości następujących algorytmów pomiarowych:

$$f_m = \frac{k}{2 \cdot M_k \cdot T_p} \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot T_p \cdot \left( M_{0,5} + \left( \frac{x_{k+1}}{x_{k+1} - x_1} \right)_p - \left( \frac{x_{m+1}}{x_{m+1} - x_m} \right)_{p+1} \right)} \quad (2)$$

$$f_m = f_1 + \frac{C \cdot f_1}{N_1 - C} \quad (3)$$

$$f_m = \frac{f_p}{2k\pi} \arccos \left\{ 0,5 \frac{y_s(n)y_c(n-2k) - y_c(n)y_s(n-2k)}{y_s(n)y_c(n-k) - y_c(n)y_s(n-k)} \right\} \quad (4)$$

$$f_m = \sqrt{\frac{-x''}{x \cdot 4\pi^2}} \quad (5)$$

gdzie:  $M_k$  – liczba próbek w  $k$  półokresach sygnału;  $k$  – liczba półokresów, w których zliczane są impulsy;  $T_p$  – okres próbkowania;  $x$  – wartości chwilowe sygnału, którego częstotliwość jest mierzona;  $p+1, p$  – indeksy oznaczające odpowiednio ostatnie i przedostatnie przejście sygnału przez zero; indeksy próbek z indeksem  $+1$  oznaczają pierwszą próbkę po zmianie znaku, a próbki z indeksem o jeden mniejszym oznaczają ostatnią próbkę przed zmianą znaku;  $N_1$  – liczba próbek przypadających na jeden okres składowej podstawowej;  $C$  – iloraz amplitud sygnału  $x$  po filtracji i przed filtracją przy pomocy filtru o oknie będącym funkcją Walsh'a zerowego rzędu.

Do wyznaczenia składowych ortogonalnych ( $u_s, u_c, i_s, i_c$ ) wykorzystać:

a) ortogonalizację przez opóźnienie

$$x_c(n) = x(n)$$

grupy parzyste 
$$x_s(n) = \frac{x(n-k) - x(n) \cdot \cos(k\Omega_1)}{\sin(k\Omega_1)} \quad (6)$$

$$x_c(n) = x(n-k)$$

grupy nieparzyste 
$$x_s(n) = \frac{x(n-2k) - x(n)}{2 \sin(k\Omega_1)} \quad (7)$$

b) cyfrowe filtry ortogonalne: pary filtrów  $\sin$  oraz  $\cos$  (grupy parzyste) lub filtrów o oknach Walsh'a pierwszego i drugiego rzędu (grupy nieparzyste).

– przyjmując że częstotliwość składowej podstawowej  $f_1$  wynosi 50 Hz.

– przyjmując częstotliwości próbkowania  $f_p = (900 + (nr \text{ grupy}) \cdot 100)$  Hz.

2. Dla zadanych algorytmów (patrz poniżej – Badane algorytmy):

a) Określić dynamikę i dokładność pomiaru dla sygnałów niezakłóconych.

b) Zbadać jakość pomiaru przy zakłóceniu sygnału składową nieokresową o stałej czasowej zanikania z zakresu 50 – 500 ms.

c) Zbadać wpływ zakłóceń harmonicznnych na jakość pomiaru.

d) Ocenić wpływ częstotliwości próbkowania na dokładność pomiaru.

e) Dokonać pomiaru częstotliwości dla sygnałów pochodzących z modelowania sytuacji zwarciovych w programie EMTP-ATP.

**Badane algorytmy:** Gr.1-(1) i (2); Gr.2-(2) i (3); Gr.3-(3) i (4); Gr.4-(4) i (5); Gr.5-(1) i (5); Gr.6-(2) i (5); Gr.7-(3) i (5); Gr.8-(1) i (4); Gr.9-(2) i (4).

## Ćwiczenie 6 – Realizacja członu pomiarowego zabezpieczenia z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej

### Ramowy program ćwiczeń:

1. Zaprojektować sztuczną sieć neuronową realizującą pomiar amplitudy sygnału sinusoidalnego.
  - a) rozważyć różne struktury sieci.
  - b) w procesie uczenia wykorzystać różnorodny zestaw wzorców (np. tylko sygnały niezakłócone, tylko sygnały zakłócone, kombinacje dwóch poprzednich).
  - c) zbadać skuteczność uczenia w zależności od liczby prezentowanych wzorców oraz liczby iteracji.
2. Przeprowadzić testowanie sieci dla przypadków uczących i testowych.
3. Sprawdzić działanie zaprojektowanej sieci dla warunków nieidealnych (sygnały z zakłóceniami).

### Użyteczne funkcje MATLAB,a:

Wersja 5.3: newff, train, sim

```
%inicjalizacja
net = newff([0 10],[5 1],{'tansig' 'purelin'});
%trenowanie
net.trainParam.epochs = 50;
net = train(net,P,T);
%symulacja i porównanie
Y = sim(net,P);
plot(P,T,P,Y,'o')
```