

Woltomierz fazoczuły

Jacek Kopala

Politechnika Wrocławska

29 marca 2025



Politechnika Wrocławska

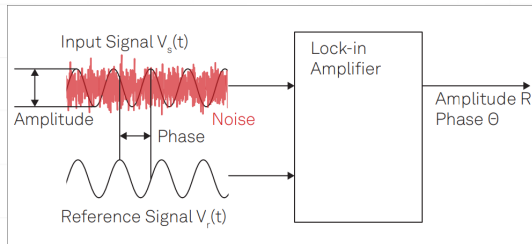
Agenda

- 1 Cel stosowania woltomierzy fazoczułych
- 2 Zasada działania
- 3 Wybrane parametry woltomierzy homodynowych
- 4 Wybrane modele



Po co stosujemy woltomierze fazoczułe?

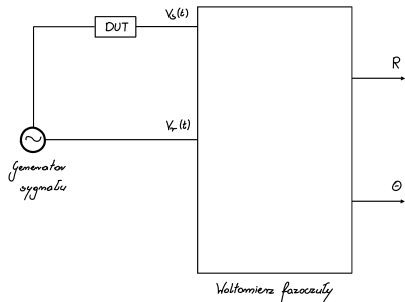
- Pomiar sygnałów zmiennych o znanej częstotliwości i bardzo niskiej amplitudzie w stosunku do szumu.
- Pomiar przesunięcia fazowego sygnału badanego względem sygnału referencyjnego.



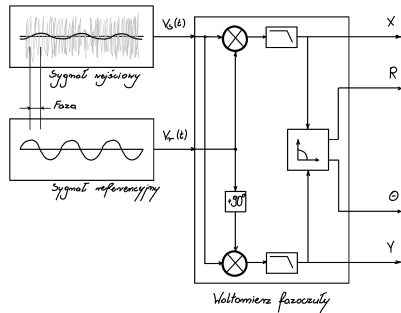
Rysunek 1: Przetwarzanie sygnałów przez woltomierz fazoczuły ¹

¹Źródło: <https://www.zhinst.com/europe/en/resources/principles-of-lock-in-detection> [22.03.2025]

Zasada działania



Rysunek 2: Sygnały woltomierza fazoczułego



Rysunek 3: Demodulator dwufazowy

Odrobina formalizmu matematycznego

$$V_s(t) = \sqrt{2}R\cos(\omega_s t + \theta) = \frac{R}{\sqrt{2}}e^{+i(\omega_s t + \theta)} + \frac{R}{\sqrt{2}}e^{-i(\omega_s t + \theta)} \quad (1)$$

$$V_r(t) = \sqrt{2}e^{-i\omega_r t} = \sqrt{2}\cos(\omega_r t) - i\sqrt{2}\sin(\omega_r t) \quad (2)$$

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = V_s(t) \cdot V_r(t) = R[e^{i[(\omega_s + \omega_r)t + \theta]} + e^{-i[(\omega_s - \omega_r)t + \theta]}] \quad (3)$$

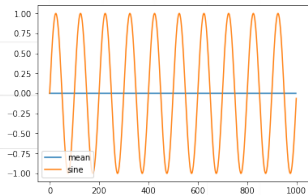
$$Z(t) = Re^{i[(\omega_s - \omega_r)t + \theta]} \quad (4)$$

$$X = \operatorname{Re}(Z), Y = \operatorname{Im}(Z) \quad (5)$$

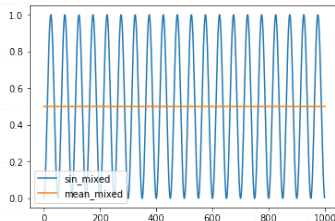
$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}, \Theta = \operatorname{atan2}(Y, X) \quad (6)$$



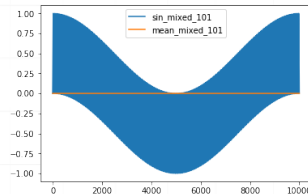
A jak to wygląda na wykresach?



Rysunek 4: Sygnał sinusoidalny $A(t)$ i jego wartość średnia ¹



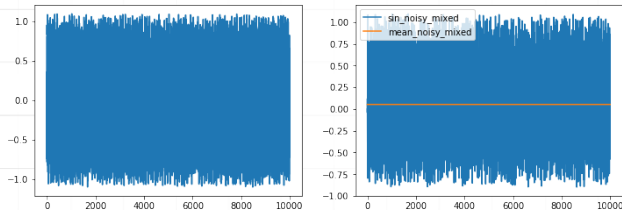
Rysunek 5: Sygnał sinusoidalny $A^2(t)$ i jego wartość średnia ¹



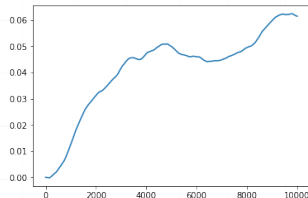
Rysunek 6: Iloczyn dwóch sygnałów $f_A \neq f_B$ i wartość średnia ¹

¹Źródło: <https://cushychicken.github.io/lock-in-amplifier-simulation/> [23.03.2025]

A jak to wygląda na wykresach?



Rysunek 7: Po lewej - zaszumiony sygnał sinusoidalny
Po prawej ten sam sygnał pomnożony przez sygnał referencyjny ¹



Rysunek 8: Iloczyn sygnału badanego i referencyjnego po nałożeniu filtra dolnoprzepustowego. ¹

¹Źródło: <https://cushychicken.github.io/lock-in-amplifier-simulation/> [23.03.2025]

Wybrane parametry

Badany sygnał	Sygnał referencyjny	Filtr
<ul style="list-style-type: none">▶ Zakres częstotliwości $[HZ]$, $< 0; GHz >$▶ Częstotliwość próbkowania $[\frac{S}{s}]$, $< \frac{kS}{s}; \frac{GS}{s} >$▶ Rozdzielczość bitowa [bits], $< 8; 16 >$▶ Czułość $[V] \sim 1nV$▶ Szum wejściowy $[\frac{V}{\sqrt{Hz}}, \frac{A}{\sqrt{Hz}},] \sim kilka \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$▶ Dynamika $[dB]$, $\sim 100dB$		<ul style="list-style-type: none">▶ Stała czasowa $[s]$, $< ns; s >$

Tabela 1: Wybrane parametry woltomierzy fazoczułych.



Wybrane modele woltomierzy fazoczułych



Rysunek 9: SR830 - Stanford Research Instruments ¹

Zakres częstotliwości:
 $1\text{mHz} - 102.4\text{kHz}$
Dynamika: $> 100\text{dB}$
Cena: $\sim 8000\text{USD}$



Rysunek 10: SFHFI 8.5 GHz - Zurich Instruments ²

Zakres częstotliwości:
 $0 - 8.5\text{GHz}$
Dynamika: $\sim 100\text{dB}$
Cena: ???



Rysunek 11: MFLI 500kHz - Zurich Instruments ³

Zakres częstotliwości:
 $0 - 500\text{kHz}$
Dynamika: $> 120\text{dB}$
Cena: 6730EUR

¹Źródło: <https://www.thinksrs.com/products/sr830.html> [22.03.2025]

²Źródło: <https://www.zhinst.com/europe/en/products/shfli-lock-in-amplifier> [22.03.2025]

³Źródło: <https://www.zhinst.com/europe/en/products/mfli-lock-in-amplifier> [22.03.2025]

Dziękuję za uwagę!

