

Wojciech Stawicki
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Politechnika Łódzka
Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź
email: wojciech.stawicki@edu.p.lodz.pl

FILTRACJA PRZEBIEGÓW ELEKTRYCZNYCH – PORÓWNANIE ZASTOSOWANYCH METOD FILTRACJI

Streszczenie – W trakcie wykonywania pomiarów elektrycznych, każdy badacz narażony jest na niespodziewane trudności na które, może natrafić, takie jak np. zakłócenia mierzonych sygnałów. Zakłócenia mogą mieć wiele przyczyn, takich jak: konstrukcja układu pomiarowego, wpływ warunków atmosferycznych, obecność innych urządzeń elektrycznych pracujących w pobliżu oraz wiele innych. Do wykonania pomiarów autor wykorzystał układ Single Sheet Tester. Podczas wykonywania pomiarów, właściwości blach elektrotechnicznych stosowanych do budowy transformatorów i silników elektrycznych, autor otrzymał zniekształcone (zakłócone) przebiegi rejestrowanego prądu oraz indukowanego napięcia. W celu poprawnej interpretacji otrzymanych wyników należało więc skutecznie je odfiltrować. W artykule opisane są metody komputerowej filtracji przebiegów jakie autor zastosował, wraz z porównaniem wyników otrzymanych bezpośrednio z oscyloskopu pomiarowego oraz po zastosowaniu komputerowej filtracji.

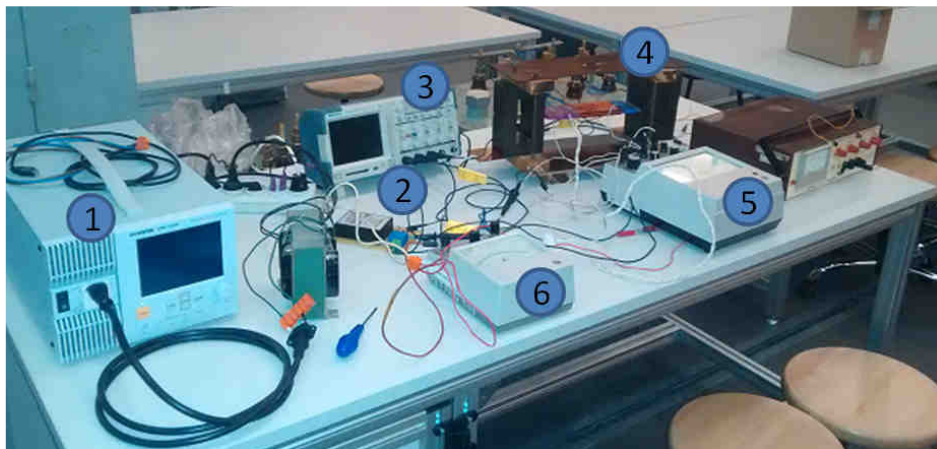
Słowa kluczowe: Filtracja przebiegów, filtr dolnoprzepustowy, Butterworth, właściwości magnetyczne materiałów

1 Wprowadzenie

W pracy opisano metody komputerowej filtracji przebiegów jakie otrzymano z oscyloskopu podczas wykonywania pomiarów właściwości materiałów magnetycznych wykorzystywanych w produkcji transformatorów. Filtracja była niezbędna, gdyż otrzymane przebiegi były zniekształcone przez szумы. W pracy został wykorzystany zmodyfikowany układ Single Sheet Tester, szczegółowo opisany w [1], posiadający nieco inną budowę (bardziej elastyczną w odniesieniu do wymiarów badanych próbek) w stosunku do klasycznego rozwiązania układu SST [2].

2 Opis stanowiska pomiarowego

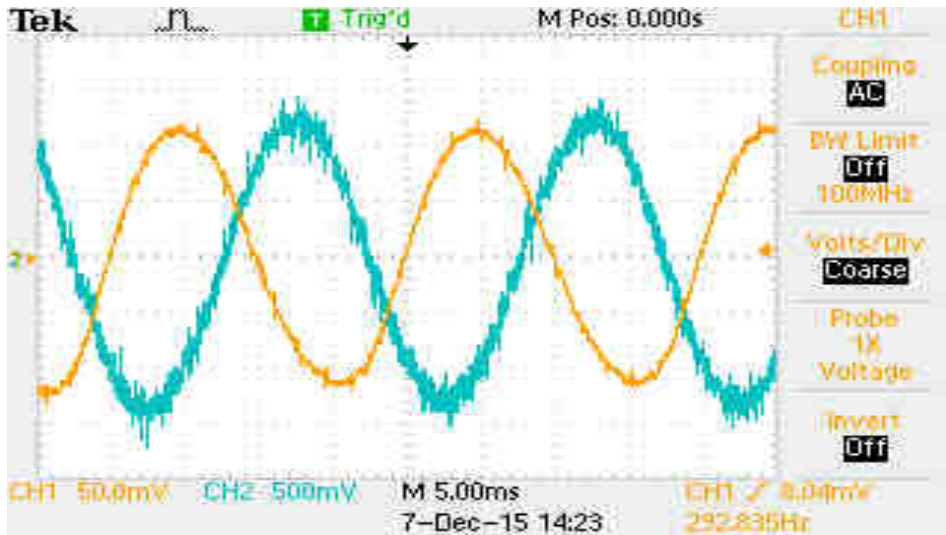
Układ pomiarowy, który wykorzystano do przeprowadzenia pomiarów parametrów magnetycznych blach stosowanych do budowy silników i transformatorów przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Stosowany układ pomiarowy. 1- Zasilacz, 2- Wzmacniacz pomiarowy LEM, 3- Oscyloskop pomiarowy, 4- Zmodyfikowany układ Single Sheet Tester, 5- Woltomierz, 6- Amperomierz. Źródło: fotografia własna

Przed przystąpieniem do pomiarów właściwości magnetycznych badanych blach, pierwszym wykonanym elementem był karkas pomiarowy, na którym nawinięto dwa rodzaje uzwojeń: uzwojenie wzbudzające oraz pomiarowe. Był to bardzo ważny element systemu gdyż wewnątrz niego umieszczono próbkę pomiarową. Rozmiary karkasu musiały odpowiadać rozmiarowi tej próbki. Napięcie wejściowe, zasilające układ SST, podano z programowalnego zasilacza Gwinstek APS-1102, w którym możliwa była regulacja częstotliwości oraz amplitudy zadawanego napięcia. Przy pomocy wzmacniacza pomiarowego LEM, do którego podpięto pierwszą sondę pomiarową, pobierano przebiegi elektryczne reprezentujące prąd, które następnie wyświetlano na ekranie oscyloskopu. W kolejnym kroku zapisywano je na nośnik pamięci przenośnej, aby następnie można je było poddać filtracji. Odczyt wartości napięcia indukowanego w uzwojeniu nawiniętym na karkasie pomiarowym, zrealizowano za pomocą drugiej sondy pomiarowej podpiętej do tego uzwojenia. Możliwe było więc zapisanie tego przebiegu w celu dalszej obróbki numerycznej. Dokładny opis zmodyfikowanego układu SST oraz koncepcji pomiarowych, znajduje się w artykule [1]. Poniżej zaprezentowano przykłady krzywych otrzymanych

z przeprowadzonych pomiarów, wyświetlonych bezpośrednio na ekranie oscyloskopu (rys. 2).



Rys. 2. Rejestrowane przebiegi znajdujące się na ekranie oscyloskopu. CH1 – Sygnał elektryczny reprezentujący prąd, uzyskany ze wzmacniacza LEM, CH2 – Indukowane napięcie rejestrowane w uzwojeniu pomiarowym karkasu. Źródło: fotografia własna

Aby poprawnie zinterpretować otrzymane przebiegi wartości prądów oraz napięć, niezbędne było wykonanie komputerowej filtracji przebiegów, gdyż jak widać na rys.2, przebiegi były zniekształcone przez szumy.

3 Filtracja otrzymanych przebiegów

Filtracja – czym jest oraz czym się charakteryzuje? Jest to proces przekształcania danych przeprowadzanych na otrzymanych wynikach w dziedzinie czasu, mający wpływ na widmo sygnału oryginalnego. W celu otrzymania jak najdokładniejszych odzwierciedleń kształtów sygnałów pomiarowych rejestrowanych na oscyloskopie, zostały podjęte próby komputerowej filtracji przebiegów.

Pierwszą opisaną metodą filtracji jaką zastosował autor, było wykorzystanie filtra dolnoprzepustowego, wykonanego przez autora w programie ICAP4, będącego elementem pakietu SPICE. W tym celu stworzył model zawierający filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu zrealizowany za pomocą odpowiedniego połączenia opornika i kondensatora – rys.3.

Filtr ten przetwarza sygnał, w sposób który przepuszcza, praktycznie bez tłumienia, harmoniczne sygnału leżące poniżej ustawionej częstotliwości granicznej, przy czym tłumi składowe widma leżące w górnej jego części.

Częstotliwość graniczna układu filtru RC jest obliczana ze wzoru [3]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi T} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

gdzie:

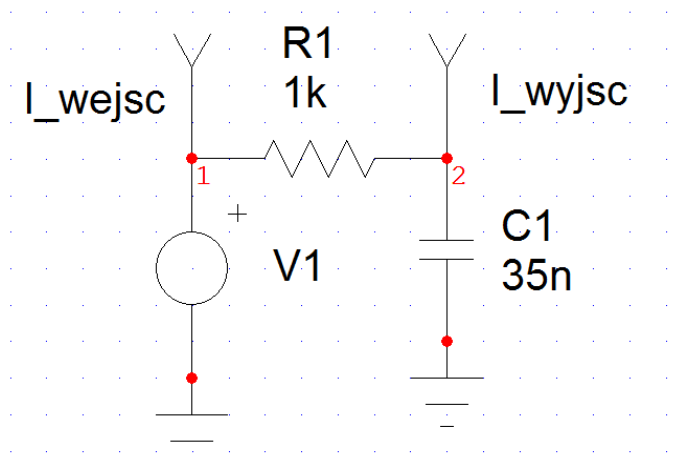
f_c – częstotliwość graniczna układu [Hz];

$T = RC$ – stała czasowa filtru RC [s];

R – rezystancja [Ohm];

C – pojemność [F].

Wynika z tego jasno że wraz ze zmianą parametrów rezystancji oraz pojemności zmianie ulega także częstotliwość graniczna filtru co ma wpływ na filtrację zadanych przebiegów, a także zawartość widma harmonicznego.

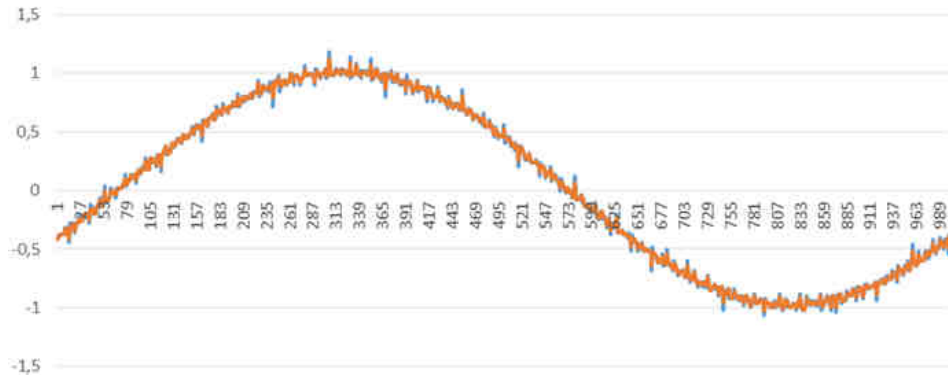


Rys. 3. Filtr dolnoprzepustowy pasywny zrealizowany w programie ICAPS4.
Źródło: opracowanie własne

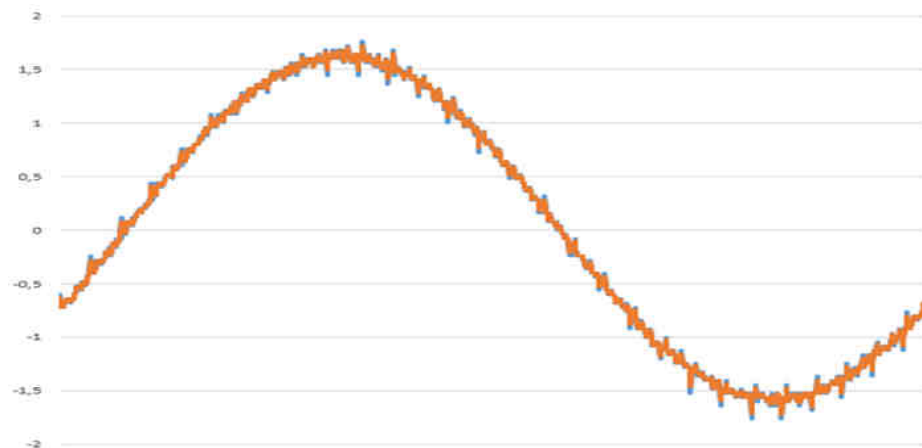
Filtrację za pomocą pasywnego dolnoprzepustowego filtru RC zrealizowano w następujący sposób:

Przebiegi elektryczne zarejestrowane za pomocą oscyloskopu, zaimportowano w postaci pliku tekstowego jako dane wejściowe dla źródła zasilania V1. Następnie sygnał ten przefiltrowano przez stworzony układ. Po przeprowadzeniu filtracji wyniki zapisano do pliku tekstowego. Na rysunku 4 porównano przebiegi rejestrowane na

oscylloskopie i uzyskane po filtracji przy użyciu filtra dolnoprzepustowego. Na pierwszy rzut oka widać, że przebieg odfiltrowano ze słabą jakością, gdyż wciąż zawiera on znaczną część zakłóceń.



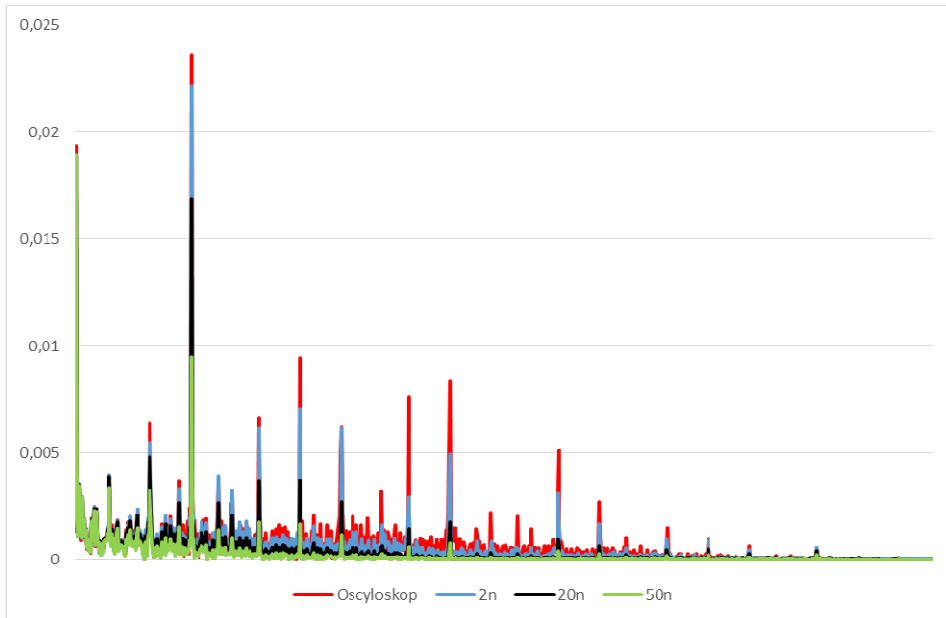
Rys. 4. Przebieg napięć. Niebieski - przebieg rejestrowany na oscylloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji filtrem dolnoprzepustowym (pojemność 50nF). Źródło: opracowanie własne



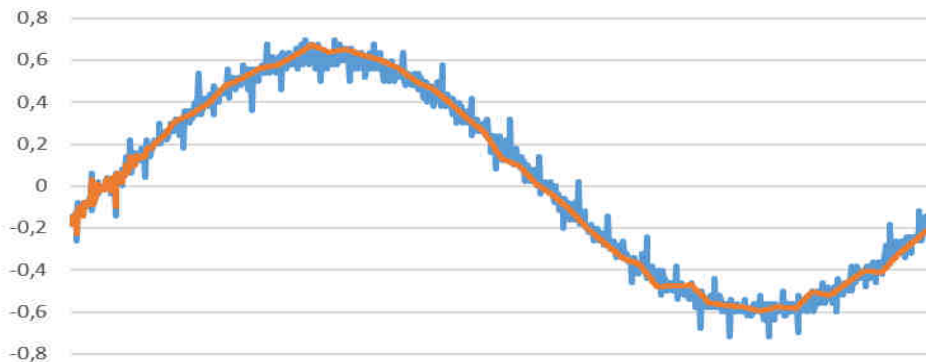
Rys. 5. Przebieg napięć. Niebieski - przebieg rejestrowany na oscylloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji filtrem dolnoprzepustowym (pojemność 2nF). Źródło: opracowanie własne

W celu zwiększenia precyzji przeprowadzono dodatkowo filtrację regulując parametry kondensatora co przedstawiono na rysunku 6, gdzie

porównano widma harmonicznch w zależności od pojemności kondensatora.



Rys. 6. Porównanie widm w zależności od pojemności kondensatora. Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Przebieg napięć. Niebieski - przebieg rejestrowany na oscyloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji filtrem dolnoprzepustowym (optimalna wartość pojemności). Źródło: opracowanie własne

Jak można łatwo zauważyć im większa wartość pojemności kondensatora filtracja jest dokładniejsza jednakże, przy bardzo dużych szumach sygnałów wejściowych, autor natrafił na takie przypadki, gdzie przefiltrowana krzywa, po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego, zmieniała swój kształt co przedstawiono na rysunku 7.

W związku z powyższym rozpoczęto poszukiwania skuteczniejszych metod komputerowej filtracji krzywych, które są bardziej efektywne oraz mniej czasochłonne.

Kolejną metodą, która rozważono była metoda średniej ruchomej. Metoda ta jest niczym innym jak średnią arytmetyczną z N obserwacji co można przedstawić w sposób następujący:

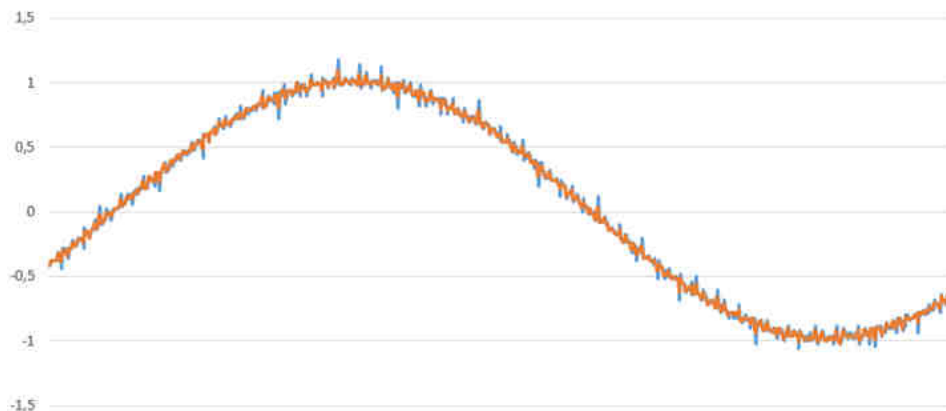
$$M_T = \frac{y_T + y_{T-1} + y_{T-2} + \dots + y_{T-N+1}}{N} \quad (2)$$

gdzie:

y_T – wartość próbki w chwili czasowej

N – liczba próbek;

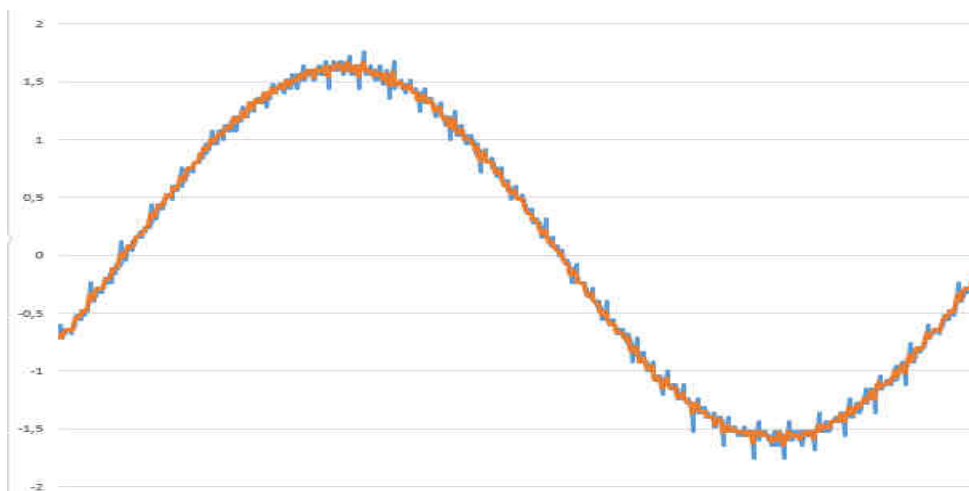
Po zastosowaniu metody średniej ruchomej otrzymano znacznie lepsze wyniki w porównaniu do tych uzyskanych za pomocą filtra dolnoprzepustowego, co można zaobserwować na rysunku 8.



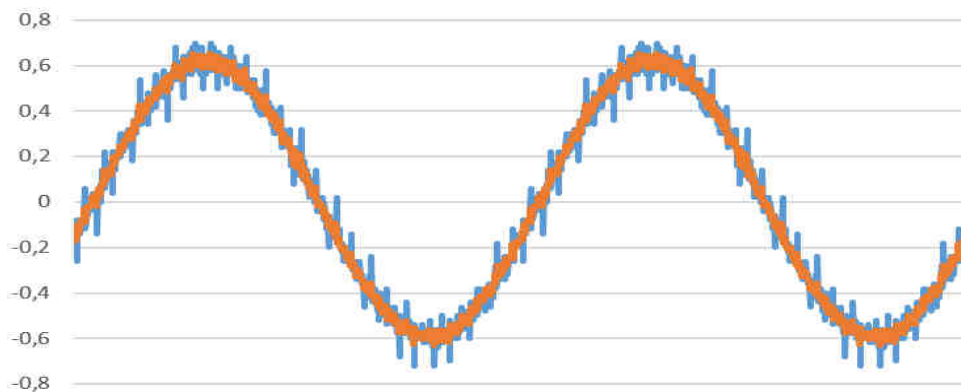
Rys. 8. Przebiegi napięcia. Niebieski – przebieg rejestrowany na oscyloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji - metoda średniej ruchomej. Źródło: opracowanie własne

Niestety metoda ta też nie jest „idealna”, gdyż w zależności od poziomu zniekształcenia sygnału wejściowego, należy zmienić wartość N , której prawidłowe uwzględnienie jest niezbędne podczas filtracji przebiegu. Zauważono, że metoda średniej ruchomej jest efektywniejsza niż metoda filtra dolnoprzepustowego opisana powyżej, gdyż w

znacznym stopniu obniża „piki” szumów co również przedstawiono na rysunkach 9 oraz 10.



Rys. 9. Przebiegi napięcia. Niebieski – przebieg rejestrowany na oscyloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji - metoda średniej ruchomej. Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Przebiegi napięcia. Niebieski – przebieg rejestrowany na oscyloskopie, Pomarańczowy - przebieg po filtracji - metoda średniej ruchomej. Źródło: opracowanie własne

Kolejnym krokiem było poszukiwanie jeszcze dokładniejszej metody filtracji przebiegów otrzymanych podczas wykonywania pomiarów właściwości magnetycznych przy użyciu SST. Autor wykorzystał więc

filtr Butterwortha [4], który wykorzystano oraz opisano poniżej. Filtr ten charakteryzuje się tym, iż w stosunku do innych filtrów jego charakterystyka amplitudowa w paśmie przepustowym jest najbardziej płaska. Filtr działa w dziedzinie częstotliwości oraz jest określony funkcją transmitancji:

$$T_d(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^{2n}}} \quad (3)$$

gdzie:

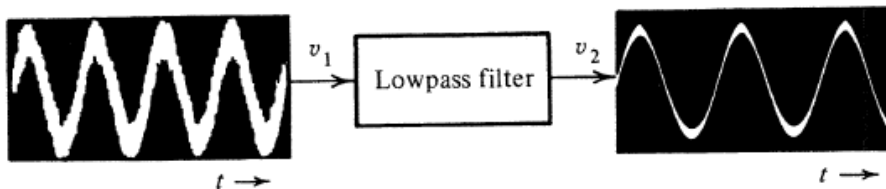
T_d – okres próbkowania sygnału [s];

f – częstotliwość [Hz];

f_0 – częstotliwość graniczna [Hz];

n – rząd filtru.

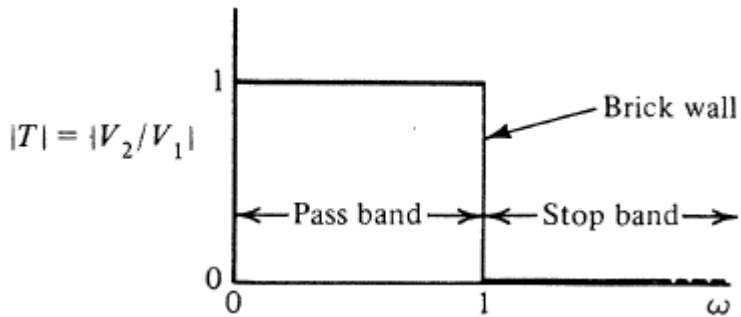
Napięcie wejściowe pokazane na rysunku 11 zawiera nisko częstotliwościowy sygnał podstawowy oraz dodatkowe wysoko częstotliwościowe sygnały, potocznie zwane szumem. W celu skutecznego wyeliminowania szumów należy wykorzystać filtr, który przepuszcza niskoczęstotliwościowe sygnały bez tłumienia, a jednocześnie skutecznie eliminuje wysoko częstotliwościowe składniki.



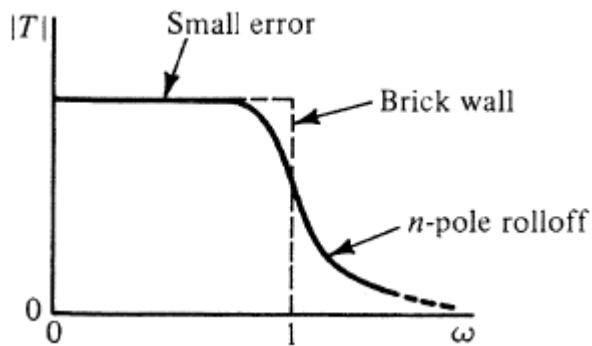
Rys. 11. Dolnoprzypustowy filtr Butterworth'a.

Wynika z tego, że poszukiwana „idealna” charakterystyka filtru dolnoprzepustowego musi posiadać poniżej znormalizowanej częstotliwości $\omega_0 = 1$, stałą amplitudę, zaś powyżej amplitudę równą 0. Pasma przepuszczania oraz pasmo blokowania powinny być widocznie odseparowane (np. dla $\omega = 1$), co zostało przedstawione na rysunku 12.

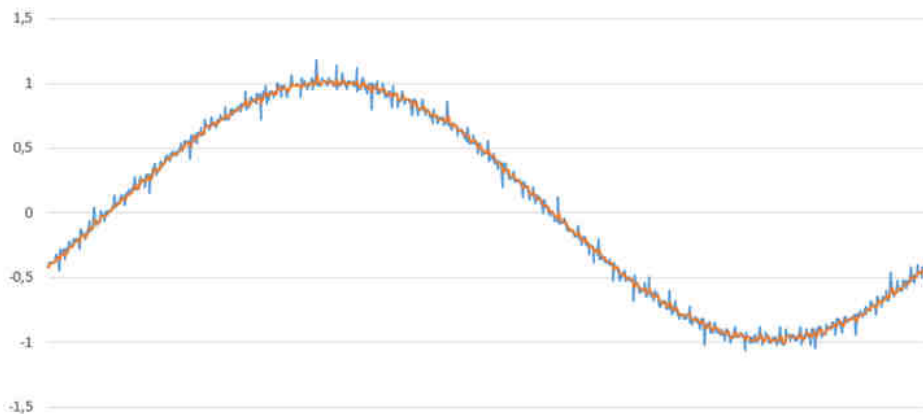
Dążąc do „idealnej” charakterystyki trzeba zadbać o takie tłumienie, które w paśmie przewodzenia powinno mieć stałą wartość (równą 0), a w paśmie blokowania wartość tłumienia większą od 0. Przejście z pasma przewodzenia do pasma blokowania powinno odbyć się poprzez nagły spadek wartości. Z praktycznego punktu widzenia charakterystyka filtru Butterwortha wygląda tak jak to przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 12. Charakterystyka idealnego filtra dolnoprzepustowego.



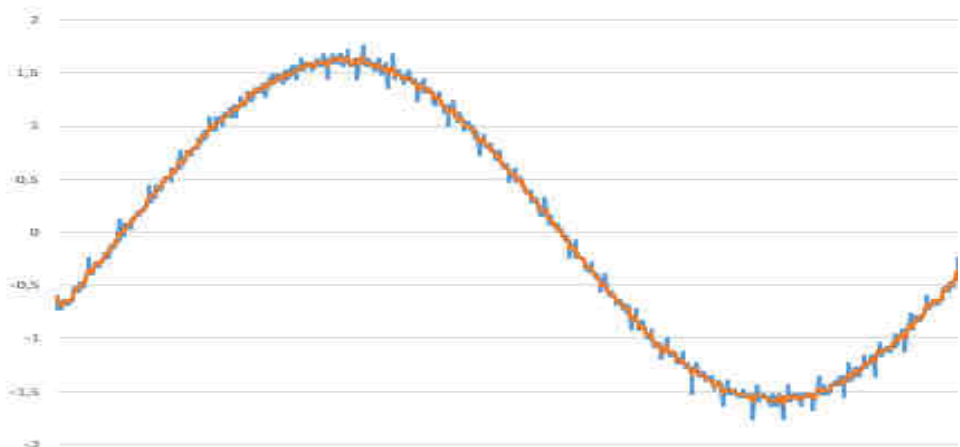
Rys. 13. Charakterystyka rzeczywistego filtra Butterworth'a



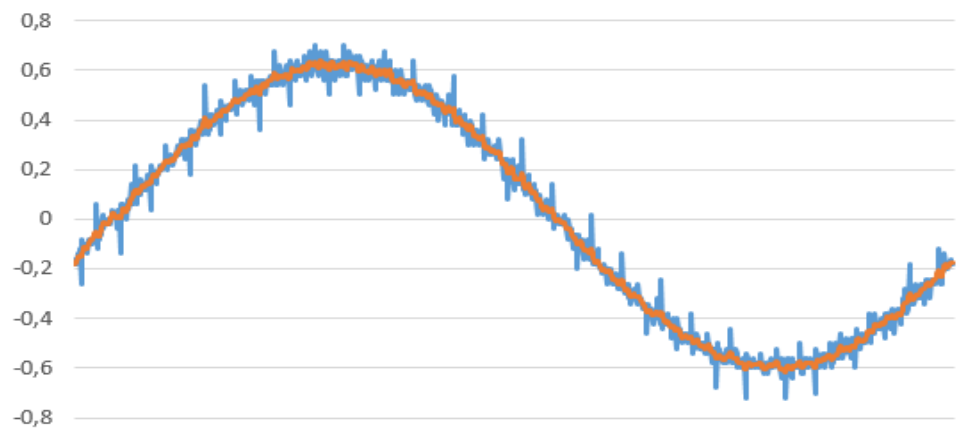
Rys. 14. Przebieg napięcia Niebieski – przebieg napięcia rejestrowanego na oscyloskopie, Pomarańczowy – przebieg po filtracji - metoda Butterwortha. Źródło: opracowanie własne

Jak widać charakterystyka filtru Butterwortha jest zbliżona do charakterystyki idealnego filtru dolnoprzepustowego, lecz niestety przejście między pasmami przewodzenia i blokowania ma charakter powolnej zmiany amplitudy sygnału, zamiast gwałtownej zmiany jego wartości [5].

Po zastosowaniu opisanej filtracji w stosunku do zmierzonych przebiegów, otrzymano efekt przedstawiony na rysunku 14.



Rys. 15. Przebieg napięcia Niebieski – przebieg napięcia rejestrowanego na oscyloskopie, Pomarańczowy – przebieg po filtracji - metoda Butterwortha. Źródło: opracowanie własne

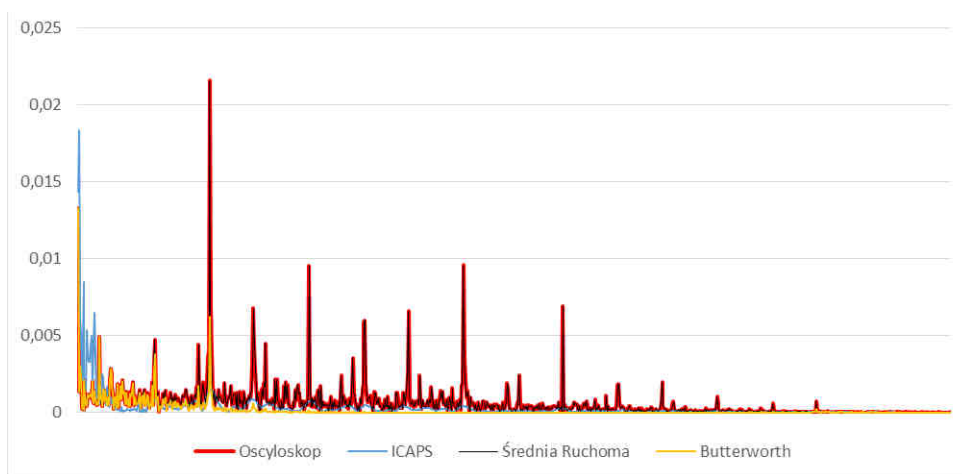


Rys. 16. Przebieg napięcia Niebieski – przebieg napięcia rejestrowanego na oscyloskopie, Pomarańczowy – przebieg po filtracji - metoda Butterwortha. Źródło: opracowanie własne

Jak łatwo zauważyć filtracja metodą Butterwortha jest najlepszą spośród metod przedstawionych w tej pracy. Niezależnie od wielkości szumów kształt krzywej po filtracji jest bardzo zbliżony bądź nawet identyczny, co można przedstawić na rysunkach 15 oraz 16.

4 Podsumowanie

Z przedstawionych badanych metod cyfrowej filtracji sygnałów, najlepszy rezultat osiągnięto przy zastosowaniu filtru Butterwortha, co dodatkowo przedstawiono na rysunku 17. w postaci wykresów, dzięki którym porównano widma harmoniczných dla każdej opisanej metody.



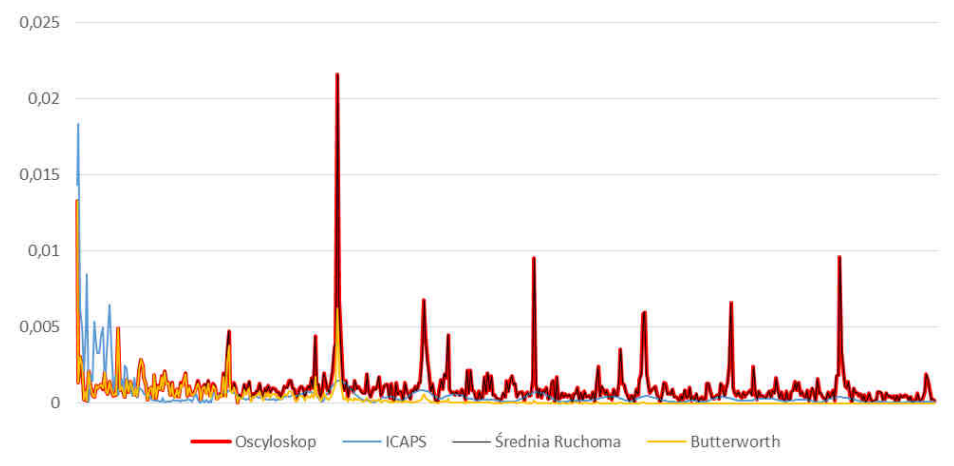
Rys. 17. Porównanie widm harmoniczných dla opisanych metod. Źródło: opracowanie własne

Po analizie powyższych wykresów już na pierwszy rzut oka widać, że metoda średniej ruchomej jedynie zmniejsza amplitudę kolejnych harmoniczných, lecz początek przebiegu jest bardzo mocno zniekształcony. Filtr Butterwortha osiągnął najlepszy rezultat w postaci zarówno szybkiego zniwelowania kolejnych harmoniczných oraz znacznego zmniejszenia amplitudy początkowych harmoniczných.

Dla dokładniejszego udokumentowania powyższych wniosków zakres harmoniczných skrócono o ponad połowę, co przedstawiono na rysunku 18.

W dalszej części badań parametrów magnetycznych blach stosowanych w elektrotechnice, które będą dalej prowadzone, autor również będzie wykorzystywał filtr Butterwortha, dzięki któremu osiągnął

zamierzony efekt jakim było skuteczne odfiltrowanie zarejestrowanych przebiegów.



Rys. 18. Porównanie widm harmonicznych dla opisanych metod połowa zakresu. Źródło: opracowanie własne

5 Literatura

- [1] Z. Gmyrek, *Singe Sheet Tester with Variable Dimensions*. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, vol. 65, no. 7, pp. 1661-1668, 2016
- [2] Norma CEI IEC 60404-3 ed.2.1. 2002r.
- [3] Changho Seok, Kyomuk Lim, Jindeok Seo, Hyeunho Kim, Seunghyun Im, Ji-Hoon Kim, Choul-Young, Hyoungko Ko *Area-efficient RC Low Pass Filter using T-networked Resistors and Capacitance Multiplier*. International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013) Oct. 20-23, 2013 in Kimdaejung Convention Center, Gwangju, Korea
- [4] A. Soltan Ali, A. G. Radwan, Senior Member, IEEE, and Ahmed M. Soliman, Life Senior Member, IEEE, *Fractional Order Butterworth Filter: Active and Passive Realizations*. IEEE Journal On Emerging And Selected Topics In Circuits And Systems, Vol. 3, No. 3, pp 346 – 354, 2013
- [5] M. E. Van Valkenburg, *Analog Filter Design*, Oxford University Press, pp 157 – 183, 1982

THE FILTRATION OF ELECTRICAL WAVEFORMS – THE COMPARISON OF FILTRATION METHODS

Summary: To perform research author has used Single Sheet Tester. While taking electrical measurements an error could appear caused by signal interference. Those errors could be caused by several factors like instrumental error, presence of other devices, or environmental factors and also many others. Author performed the research of magnetic properties steel sheets used to create transformers and electrical engines. The researcher observed disordered waveforms for recorded current and induced voltage. Author performed filtration of those waveforms in order to proper interpret obtained data. This paper contains description of a few computer filter methods, which have been used during the research. This article also describes comparison of filtered waveforms and unfiltered results obtained from oscilloscope.

Keywords: Single Sheet Tester, low pass filter, waveforms filtration, Butterworth filter

