

Jarosław Czornik, Maciej Haltof, Leszek Jasiński  
ELHAND TRANSFORMATORY, Lubliniec

## FILTRY SINUSOIDALNE JAKO SKUTECZNA OCHRONA WYSOKOOBROTOWYCH SILNIKÓW W UKŁADACH NAPĘDOWYCH O PODWYŻSZONEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

### SINEWAVE FILTERS AS AN EFFECTIVE PROTECTION OF HIGH-SPEED MOTOR IN HIGH FREQUENCY DRIVES

**Streszczenie:** Układy napędowe o podwyższonej częstotliwości to grupa urządzeń, która w ostatnich latach najmocniej zaznaczyła swoją obecność na rynku Oil & Gas. Podwyższona częstotliwość napięcia wyjściowego przekształtnika umożliwia regulację prędkości obrotowych w szerszym zakresie. Zwiększa to wydajność i uniwersalność całego napędu, ale jednocześnie powoduje dodatkowe zagrożenia dla izolacji kabli zasilających, transformatora podwyższającego jak i samego silnika. Niezbędnym elementem takiego układu staje się filtr sinusoidalny, który zapewnia ochronę i niezawodność całego napędu. W artykule przedstawiono analizę doboru elementów składowych filtra sinusoidalnego LC i ich parametrów względem podwyższonej częstotliwości pracy i częstotliwości przełączeń. Przedstawiono wyniki badań wpływu tych parametrów na pracę filtru oraz na przebieg napięcia wyjściowego i współczynnik odkształcenia THDu.

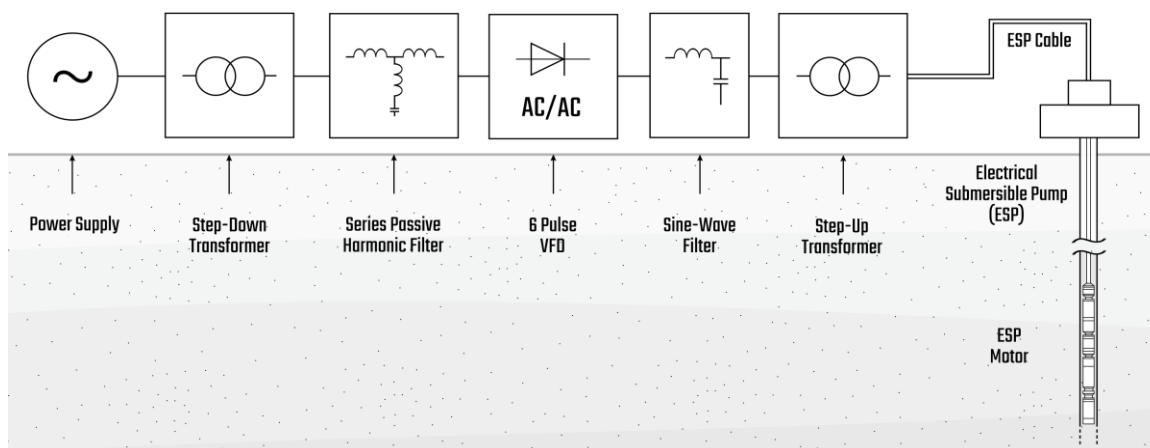
**Abstract:** Drive systems with increased frequency are a group of devices that has made a significant presence in the Oil & Gas industry in recent years. Increased frequency of the converter output voltage allows speed changes in a wider range. This increases the efficiency and versatility of the entire drive, but at the same time causes additional stresses for the insulation of the power cables, the step-up transformer and the motor itself. Therefore, an indispensable element of such a system is a sinusoidal filter, which ensures protection and reliability of the entire drive. The article presents an analysis of the selection of components of a sinusoidal LC filter and its parameters in a relation to the increased operating frequency and switching frequency. The results of the research on the influence of these parameters on the filter operation, output voltage and the THDu coefficient have been presented.

**Słowa kluczowe:** filtry sinusoidalne, napędy o podwyższonej częstotliwości, silniki wysokoobrotowe  
**Keywords:** sinewave filters, high frequency drives, high-speed motor

### 1. Wprowadzenie

Od współczesnych systemów wydobywania ropy naftowej (ESP – Electrical Submersible Pumping System) wymaga się stosowania wysoko- i sprawnych maszyn i urządzeń oraz regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Wyposażone są one najczęściej w silniki z magnesami trwałymi (PMM – Permanent Magnet Motor). W przeciwieństwie do standardowych silników indukcyjnych, silniki PMM wykorzystują magnesy ziem rzadkich do wytworzenia stałego pola magnetycznego wirnika, co bezpośrednio przekłada się na wyższą sprawność i energooszczędność oraz większą gęstość mocy i mniejsze wymiary [1]. Silniki te są niezwykle wydajne podczas pracy z typowymi i wyższymi prędkościami obrotowymi 500 – 10000 obr./min co ma zastosowanie w złożach o małej lepkości i wysokim przepływie płynów, jak również z prędkościami

niższymi 100 – 500 obr./min w złożach z płynami o dużej lepkości i niskim przepływie. Konieczność tak szerokiej regulacji prędkości obrotowej silników i pomp głębinowych jest realizowana za pomocą przekształtników o podwyższonej częstotliwości napięcia wyjściowego (VFD – Variable Frequency Drive). Regulując i kontrolując moment obrotowy przekształtniki VFD chronią pompy i silniki zmniejszając naprężenia mechaniczne i prądowe podczas rozruchu oraz dostosowują pracę całego napędu do dynamicznie zmieniających się warunków obciążenia. Jednak taki układ ma też swoje wady. Odkształcone napięcie wyjściowe przekształtnika (PWM – Pulse Width Modulation) stanowi dodatkowe zagrożenie dla izolacji kabli zasilających, transformatora podwyższającego oraz samego silnika (Rys.1). Silniki PMM są podatne na harmoniczne częstotliwości przełą-



Rys. 1. Schemat blokowy układu zasilania systemów wydobywania ropy naftowej (ESP)[2]

czania, które powodują dodatkową niepożądaną histerezę strumienia magnetycznego i prądy wirowe, zwiększając straty i temperaturę silnika. Dodatkowo wirniki silników PMM są wrażliwe na wysokie temperatury. Podwyższone warunki termiczne stwarzają ryzyko spadku momentu obrotowego i mocy silnika, a w skrajnym przypadku nawet trwałej demagnetyzacji wirnika. Dlatego w celu wyeliminowania harmonicznych przełączenia (PWM) stosuje się filtry sinusoidalne przystosowane do pracy z podwyższoną częstotliwością.

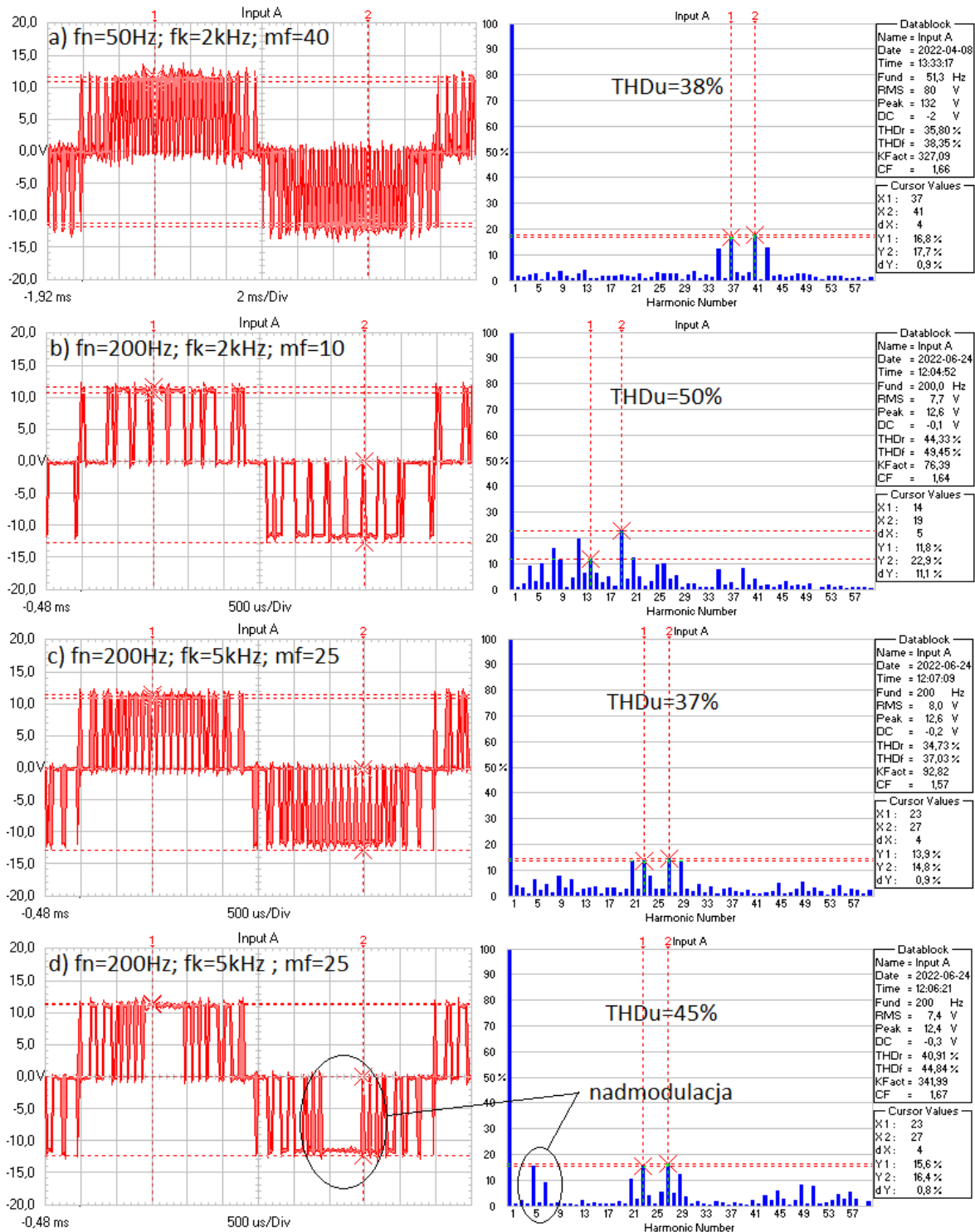
## 2. Zasilanie, rozruch i sterowanie wysokoobrotowych silników PMM

Moc silnika jest wprost proporcjonalna do jego prędkości obrotowej, dlatego nie jest zaskakujące, że branża, dla których wydajność i gabaryty maszyny mają decydujące znaczenie chętnie stosują silniki wysokoobrotowe PMM. Rozruch i sterowanie tych silników odbywa się najczęściej za pomocą przemienników VFD (silniki PMM nie mają możliwości bezpośredniego rozruchu sieciowego), a praca z dużą prędkością wymaga regulowanego napięcia wyjściowego o podwyższonej częstotliwości podstawowej (200 - 400 Hz). Wyższa częstotliwość podstawowa wymusza stosowanie wyższych częstotliwości przełączenia falownika w celu utrzymania modulacji częstotliwości  $mf$  na akceptowalnym poziomie:

$$mf = \frac{f_{\text{przełączeń}}}{f_{\text{podstawowa}}} \quad (1)$$

Im wyższa częstotliwość przełączeń w stosunku do częstotliwości podstawowej, tym większy współczynnik modulacji i mniejsze  $THDu$  na-

pięcia wyjściowego, co ułatwia odfiltrować z przebiegu wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości przełączenia. Na przykład przebieg 50 Hz generowany z częstotliwością przełączenia 2 kHz ma współczynnik modulacji 40. Jednak gdy częstotliwość podstawowa zostanie zwiększona do 200 Hz, współczynnik modulacji spada do 10, a współczynnik  $THDu$  znacząco rośnie. Zwiększenie częstotliwości przełączeń do 5 kHz (przy 200 Hz) zwiększa współczynnik modulacji do 25 i poprawia  $THDu$  (Rys. 2a,b,c). W rzeczywistych układach zasilania o podwyższonej częstotliwości podstawowej dąży się do tego, aby współczynnik  $mf$  wynosił co najmniej 20. Taka wartość to niezbędne minimum, które gwarantuje uzyskanie odpowiedniej dokładności i łatwości sterowania silnikiem. Przy niższych wartościach współczynnika  $mf$  (Rys. 2b)  $THDu$  napięcia wyjściowego jest wysokie, a harmoniczne niskiego rzędu są trudne do odfiltrowania. Dodatkowym utrudnieniem zasilania i sterowaniem tego typu układów są często duże odległości pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem, dochodzące w niektórych aplikacjach do 2-3 km. Długie kable zasilające powodują spadki napięcia, które są częściowo kompensowane za pomocą zmiany przekładni napięciowej transformatora podwyższającego wyposażonego w odczepy regulacyjne [3] lub w pewnym zakresie nadmodulacją napięcia wyjściowego VFD. Nadmodulacja umożliwia wzrost wartości skutecznej napięcia powyżej napięcia znamionowego [4]. Funkcja ta jest z jednej strony bardzo pożyteczna, ponieważ pozwala kompensować spadek napięcia (mocy) i w niektórych przypadkach może przyspieszać dynamikę od-



Rys. 2. Oscylogramy i rozkład harmonicznych napięcia wyjściowego z różnymi częstotliwościami pracy i przełączeń [2]

-powiedzi systemu zasilania na zadane warunki pracy. Jednak z drugiej strony nadmodulacja ma niekorzystny wpływ na zawartość harmonicznych w przebiegu wyjściowym napięcia VFD a tym samym harmonicznych prądu, co prowadzi do zwiększonego tętnienia momentu

silnika. Dzieje się tak na skutek wydłużenia czasu trwania (szerokości) środkowego impulsu, czego konsekwencją jest pojawienie się w przebiegu wyjściowym harmonicznych niskiego rzędu, tj. 5h, 7h, itd. co zwiększa

współczynnik zniekształcenia napięcia  $THDu$  (Rys. 2d).

### 3. Dobór parametrów filtrów do pracy przy podwyższonej częstotliwości

Filtry sinusoidalne przeznaczone do pracy z wyższymi częstotliwościami (200 – 400 Hz) służą zasadniczo temu samemu celowi, co ich odpowiedniki o częstotliwości sieciowej. Usuwają wyższe harmoniczne związane z częstotliwością przełączania, wytwarzając prawie sinusoidalny przebieg napięcia i prądu. Różnica pojawia się w doborze parametrów  $LC$ , częstotliwości rezonansowej i częstotliwości przełączeń oraz konstrukcji dławika. Dobór indukcyjności  $L$  jest kluczowy, ponieważ każda dodatkowa impedancja powoduje dodatkowy spadek napięcia i zmniejsza prąd płynący w obwodzie, zmniejszając tym samym moc dostarczaną przez silnik. Należy pamiętać, że spadek napięcia jest proporcjonalny do reaktancji dławika, a tym samym do częstotliwości:

$$u_x[\%] = \frac{I_N X_L \sqrt{3}}{U_N} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (3)$$

Standardowe filtry sinusoidalne stosowane w przypadku częstotliwości sieciowej mają reaktancję w zakresie od 6% do 12% w zależności od zastosowanej częstotliwości przełączeń. Gdyby zastosowano standardowy filtr w układzie o częstotliwości podwyższonej np.: 300 Hz, reaktancja wzrosłaby sześciokrotnie. Oznaczałoby to reaktancję z zakresu od 36% do 72%, filtr w takim przypadku traci całkowicie

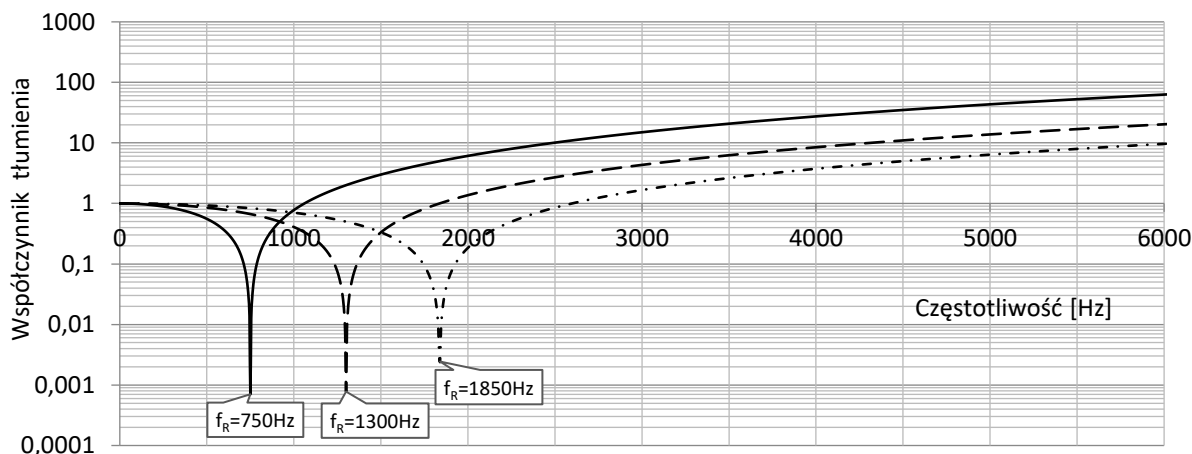
swoją funkcjonalność ze względu na ogromny spadek napięcia. Podobnie jest w przypadku części pojemnościowej filtru. Prąd pojemnościowy pobierany przez kondensator w układzie 300 Hz będzie sześciokrotnie większy niż w układzie 50 Hz, ponieważ jest on również proporcjonalny do częstotliwości:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = U_C \omega C = U_C 2\pi f C \quad (4)$$

Ograniczanie prądu pojemnościowego jest bardzo ważne, gdyż powoduje on dodatkowe obciążenie przekształtnika. Jak widać standardowe filtry sinusoidalne o częstotliwości sieciowej nie nadają się do bezpośredniego zastosowania w układach o podwyższonej częstotliwości. Odpowiednio dobrana indukcyjność i pojemność tworzą filtr sinusoidalny dolnoprzepustowy o częstotliwości rezonansowej:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Wartość częstotliwości rezonansowej powinna być odpowiednio dobrana względem częstotliwości pracy  $f_N$  i częstotliwości przełączeń  $f_K$ , oddzielając pasmo przenoszenia od pasma tłumienia oraz kształtując odpowiednio współczynnik tłumienia filtru (Rys. 3). Im większy iloczyn  $LC$  tym niższa częstotliwość rezonansowa filtru, co z kolei przekłada się na wyższy współczynnik tłumienia dla określonej częstotliwości przełączeń.



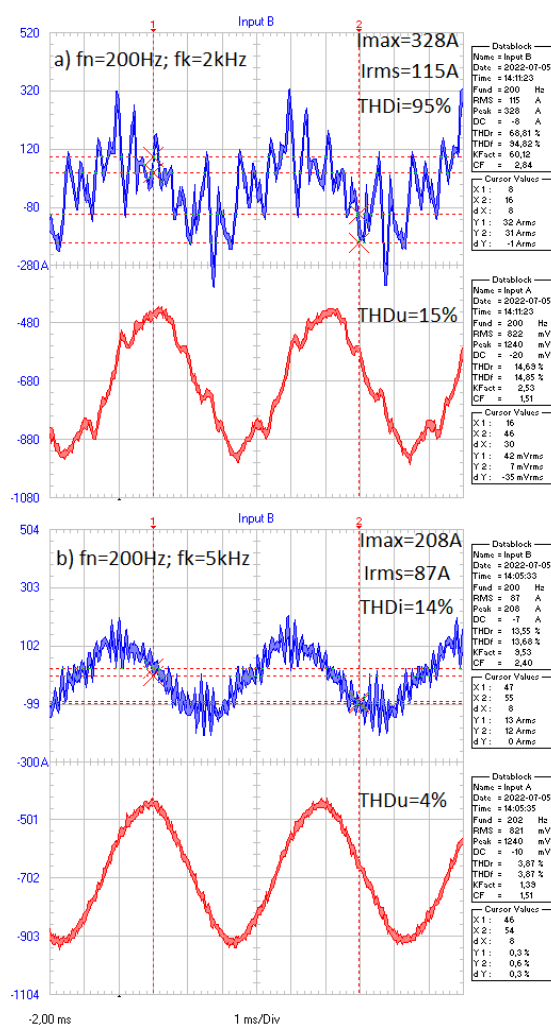
Rys. 3. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe filtra  $LC$  w przypadku różnych częstotliwości rezonansowych [2]

#### 4. Dobór częstotliwości przełączeń – dla czego warto ją zwiększyć?

Dobór częstotliwości przełączeń w układach o podwyższonej częstotliwości to zagadnienie dosyć skomplikowane. Jak wykazano wcześniej zwiększanie częstotliwości przełączeń poprawia współczynniki  $mf$  i  $THDu$  napięcia wyjściowego. Ma to też jednak swoje negatywne konsekwencje w postaci dodatkowych strat cieplnych w przekształtniku, dlatego producenci przekształtników niechętnie dążą do jej zwiększania. Niemniej jednak w przypadku konieczności stosowania na wyjściu przekształtnika filtrów sinusoidalnych zyskujemy kolejne argumenty, aby tą częstotliwość przełączeń jednak zwiększyć.

Jednym z powodów jest wartość skuteczna prądu pojemnościowego (4). Wartość tego prądu zależy nie tylko od częstotliwości podstawowej

ale również od częstotliwości przełączeń (Rys. 4). Im większa częstotliwość przełączeń tym mniejsze amplitudy harmonicznych i mniejsza wartość skuteczna i maksymalna prądu pojemnościowego. Mniejsze amplitudy harmonicznych prądu mają istotny wpływ na ograniczenie gabarytów dławika filtru i poprawę jego warunków pracy (mniejsze straty i hałas). Mniejsza wartość prądu pojemnościowego filtru to również mniejsze obciążenie przekształtnika, a więc w pewnym stopniu równoważą się to ze zwiększonymi stratami dodatkowymi przekształtnika od częstotliwości przełączeń. Kolejnym powodem dla którego warto zwiększać częstotliwość przełączeń jest współczynnik odkształceń napięcia wyjściowego  $THDu$ . Tutaj sprawa jest oczywista, łatwiej i taniej odfiltrować przebieg, który wstępnie jest mniej odkształcony. Potrafimy porównać przebieg napięcia wyjściowego przekształtnika bez filtru oraz po zastosowaniu filtru dla częstotliwości przełączeń 2 kHz i 5 kHz (Rys. 2b i 2c oraz Rys. 4a i 4b). W przypadku częstotliwości przełączeń 2 kHz filtr poprawia współczynnik  $THDu$  około 3-krotnie z wartości 50% do 15%. Natomiast ten sam filtr w przypadku częstotliwości przełączeń 5 kHz ogranicza  $THDu$  z 37% do niespełna 4% (czyli ponad 9-krotnie). Wpływ częstotliwości przełączeń na prąd pojemnościowy oraz na odkształcenie napięcia wyjściowego filtru przedstawiony został również w Tabeli 1. Wyniki te wskazują jednoznacznie, że wyższa częstotliwość przełączeń pozostawia również sporo miejsca na optymalizację filtru pod względem stosowania mniejszej indukcyjności i/lub mniejszej pojemności, co pozwala zmniejszyć spadek napięcia i prąd pojemnościowy. Jak wynika z powyższej analizy i pomiarów zastosowanie filtru sinusoidalnego w układzie o podwyższonej częstotliwości może ograniczyć odkształcenia napięcia wyjściowego przekształtnika  $THDu$  nawet do poziomu poniżej 5%. Są to warunki zbliżone do zasilania sieciowego, co jest dużym odciążeniem zarówno w przypadku transformatora podwyższającego jak i kabla zasilającego, a szczególnie dla silnika PMM. Filtr sinusoidalny wygładza sinusoidę napięcia wyjściowego kosztem odkształconego prądu pojemnościowego. Prąd pojemnościowy sumuje się z właściwym prądem obciążenia filtru, a więc filtr przejmuje na siebie straty dodatkowe związane z częstotliwością przełączeń, które wystąpiłyby w transformatorze, kablu i silniku.



Rys. 4. Oscylogramy prądu pojemnościowego i napięcia wyjściowego filtru EF3LC-415A 400V 200Hz dla różnych częstotliwości [2]

Tabela 1. Pomiary prądu pojemnościowego i odkształcenia napięcia wyjściowego filtru EF3LC-415A 400V 200Hz w zależności od częstotliwości przełączy [2]

f <sub>N</sub>	f <sub>K</sub>	Prąd pojemnościowy			THDu
		I <sub>CRMS</sub>	I <sub>C MAX</sub>	THDi <sub>C</sub>	
Hz	kHz	A	A	%	%
200	2	115	328	95	14,9
200	3	101	272	59	8,7
200	4	93	232	38	7,6
200	5	87	208	24	3,9
200	6	83	198	14	3,2

Wpływ odkształcenia prądu na pracę i konstrukcję elementów magnetycznych filtru jest ogromny. Straty dodatkowe wynikające z zachodzących w nich zjawisk pasożytniczych wymuszają stosowanie konstrukcji wieloszczelinowych oraz ograniczenia poziomu indukcji w rdzeniu. Ogranicza to straty wynikające z prądów wirowych w rdzeniu i uzwojeniach powstałe poprzez strumień skojarzony ze szczelinami tzw. Fringing Flux [5]. Stosując wyższą częstotliwość przełączy zmniejszamy zniekształcenie prądowe, a więc mamy wpływ na ograniczenie strat i gabarytu filtru. Wobec tego dobór częstotliwości przełączy w tego typu układach to kompromis pomiędzy kosztami i możliwościami ograniczania strat dodatkowych w przekształtniku wynikających ze zwiększonej częstotliwości przełączy, a kosztami i efektami filtracji pasywnej, która jest konieczna przy zasilaniu silników PMM.

## 5. Podsumowanie

Efekty instalacji filtrów sinusoidalnych w układach o podwyższonej częstotliwości z silnikami PMM o dużych prędkościach obrotowych i znacznej mocy są bardziej wyraźne niż w przypadku tradycyjnych silników indukcyjnych o częstotliwości sieciowej. Pamiętać należy, że w takich układach filtr sinusoidalny to poprawa warunków pracy i zwiększenie niezawodności nie tylko samego silnika ale również pozostałych elementów układu napędowego, tj. transformatora podwyższającego czy kabla zasilającego. Filtr eliminuje dwa największe zagrożenia, które wpływają na niezawodność i żywotność całego układu napędowego tj. odkształcenie napięcia, całkowicie niwelując strome jego narastanie będące bezpośrednim zagrożeniem dla izolacji oraz redukuje dodat-

kowe straty ciepłe będące efektem zarówno przepływu odkształconego strumienia magnetycznego w rdzeniach czy zniekształconego prądu w uzwojeniach roboczych. Z kolei częstotliwość przełączy ma istotne znaczenie przy doborze filtracji pasywnej i pozostałych elementów w układach o podwyższonej częstotliwości. Dobór częstotliwości przełączy powinien szczególnie uwzględniać wpływ na parametry elementów pasywnych, prąd pojemnościowy filtru oraz sprawność i wydajność całego układu.

## 6. Literatura

- [1]. J. F. Gieras „Permanent magnet motor technology: design and application” 3rd ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010.
- [2]. ELHAND Transformatory Sp. z o.o. – Materiały i opracowania własne, Lubliniec, 2022.
- [3]. T. Orłowski & L. Jasinski „Application of New Generation Transformer Harmonic Filter Hybrid Solution To Reduce Footprint and Operating Cost at the well site” ADIPEC - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, November 2019.
- [4]. X. Guo, M. He, and Y. Yang, “Over modulation strategy of power converters: A review,” IEEE Access, 2018.
- [5]. J. Czornik, M. Haltof „Wpływ filtrów harmonicznych na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia” Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 2020.

## Autorzy

mgr inż. Jarosław Czornik

[j.czornik@elhand.pl](mailto:j.czornik@elhand.pl)

dr inż. Maciej Haltof

[m.haltof@elhand.pl](mailto:m.haltof@elhand.pl)

mgr inż. Leszek Jasiński

[l.jasinski@elhand.pl](mailto:l.jasinski@elhand.pl)

ELHAND Transformatory Sp. z o.o.

ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec

Artykuł powstał przy realizacji projektu POIR-03.02.01-24-0007-18 pt. „Wdrożenie technologii produkcji ulepszonych filtrów harmonicznych zintegrowanych z transformatorami olejowymi”

