

Jarosław Czornik, Maciej Haltof, Leszek Jasiński  
ELHAND Transformatory

Lubliniec 2023

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

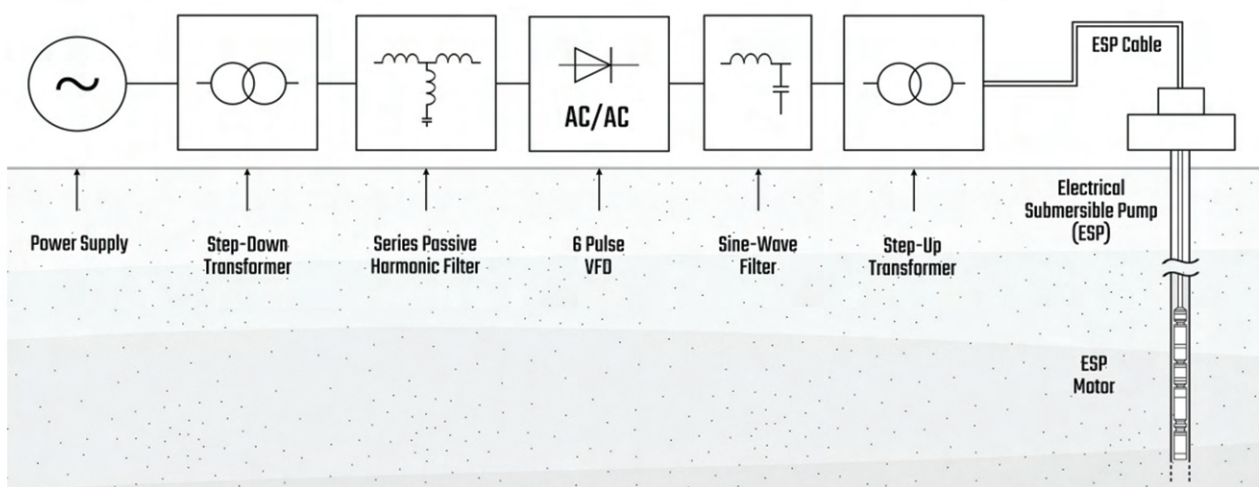
**Streszczenie:** Układy napędowe o podwyższonej częstotliwości to grupa urządzeń, która w ostatnich latach najmocniej zaznaczyła swoją obecność na rynku Oil&Gas. Podwyższona częstotliwość napięcia wyjściowego przekształtnika umożliwia regulację prędkości obrotowych w szerszym zakresie. Zwiększa to wydajność 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 filtra oraz na przebieg napięcia wyjściowego i współczynnik odkształcenia THDu.

**Słowa kluczowe:** filtry sinusoidalne, napędy o podwyższonej częstotliwości, silniki wysokoobrotowe

### 1. Wprowadzenie

Od współczesnych systemów wydobywania ropy naftowej (ESP – Electrical Submersible Pumping System) wymaga się stosowania wysokosprawnych 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



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



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. Odształcone 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 przełączania, 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 obrotowegoi mocy silnika, a w skrajnym przypadku nawet trwałej demagnetyzacji wirnika. Dlatego w celu wyeliminowania harmonicznych przełączania (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 branże, 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 przełączania 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 napięcia wyjściowego, co ułatwia odfiltrować z przebiegu wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości przełączania. Na przykład przebieg 50 Hz generowany z częstotliwością przełączania 2 kHz ma współczynnik modulacji 40.

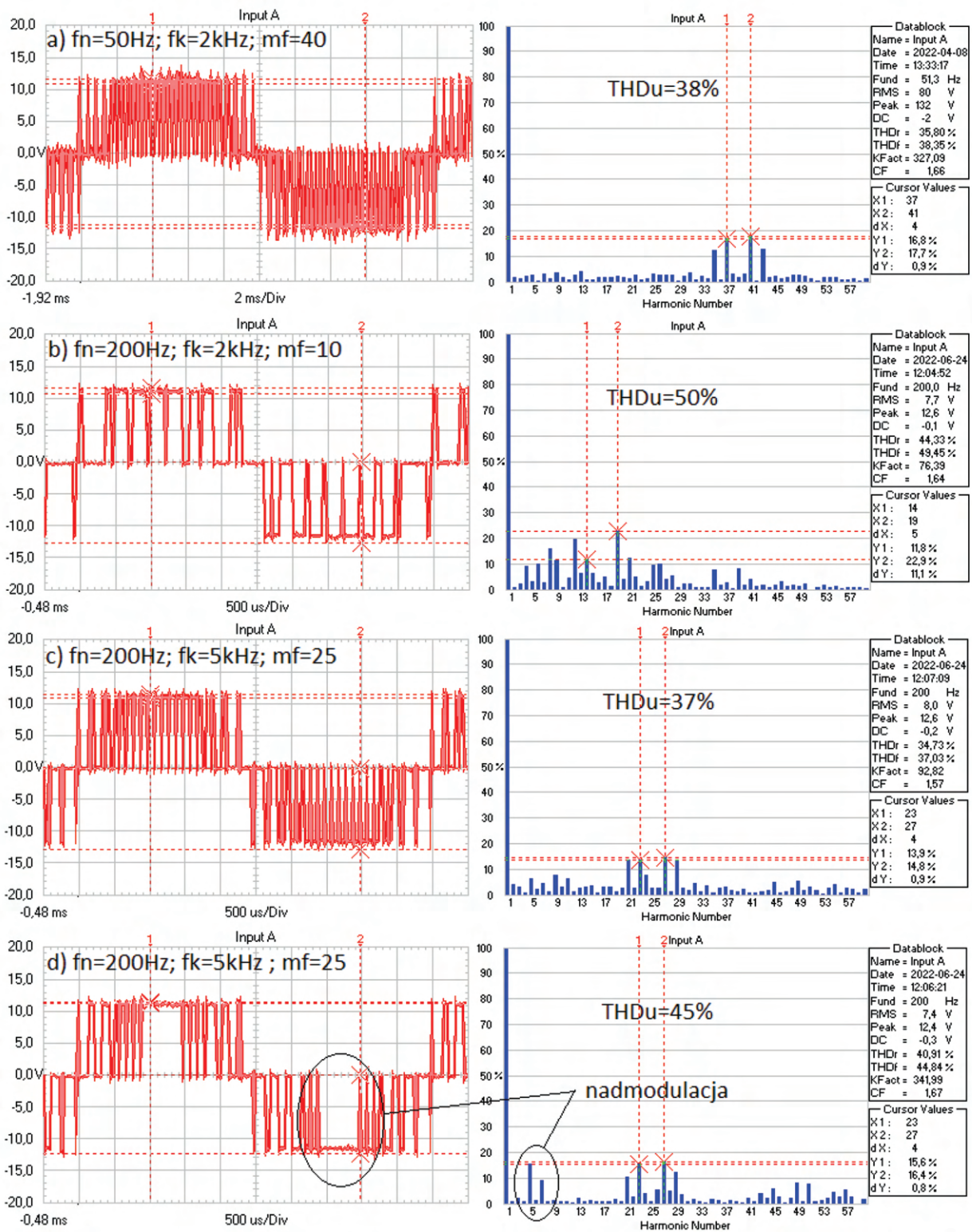
Jednak gdy częstotliwość podstawowa zostanie zwiększona do 200 Hz, współczynnik modulacji spada do 10, a współczynnik THDu znacząco rośnie. Zwiększenie częstotliwości przełączeń do 5 kHz (przy 200 Hz) zwiększa współczynnik modulacji do 25 i poprawia THDu (Rys. 2a,b,c). W rzeczywistych układach zasilania o podwyższonej częstotliwości podstawowej dąży się do tego, aby współczynnik

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 odpowiedzi 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





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



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 przełączy. 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

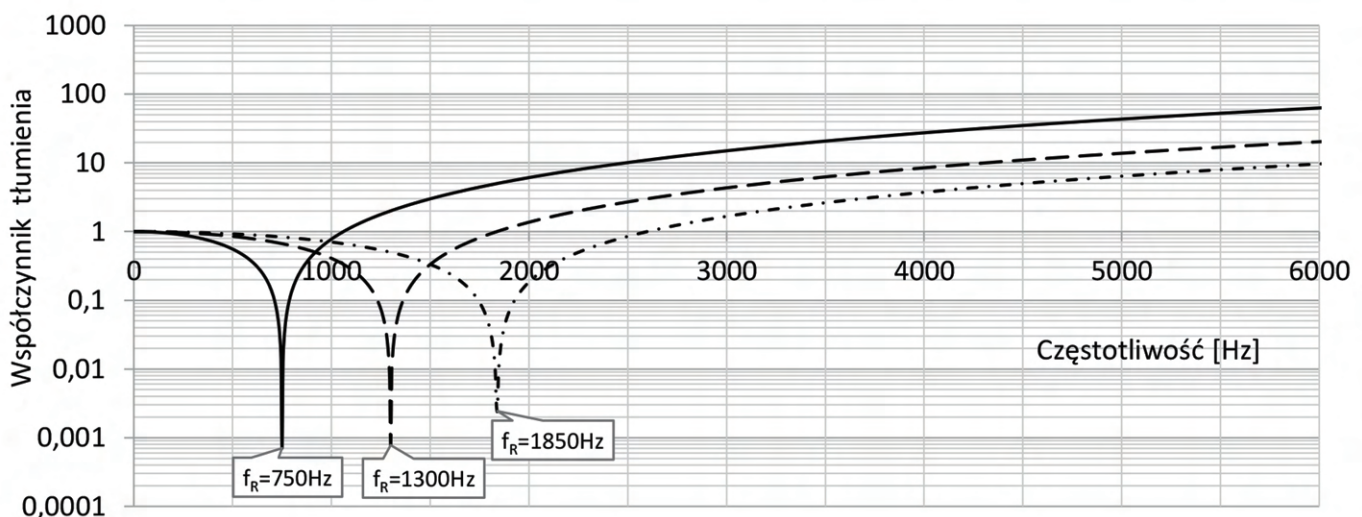
w układzie 50 Hz, ponieważ jest on również proporcjonalny do częstotliwości:

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

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 przełączy  $f_{gr}$ , 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 przełączy.

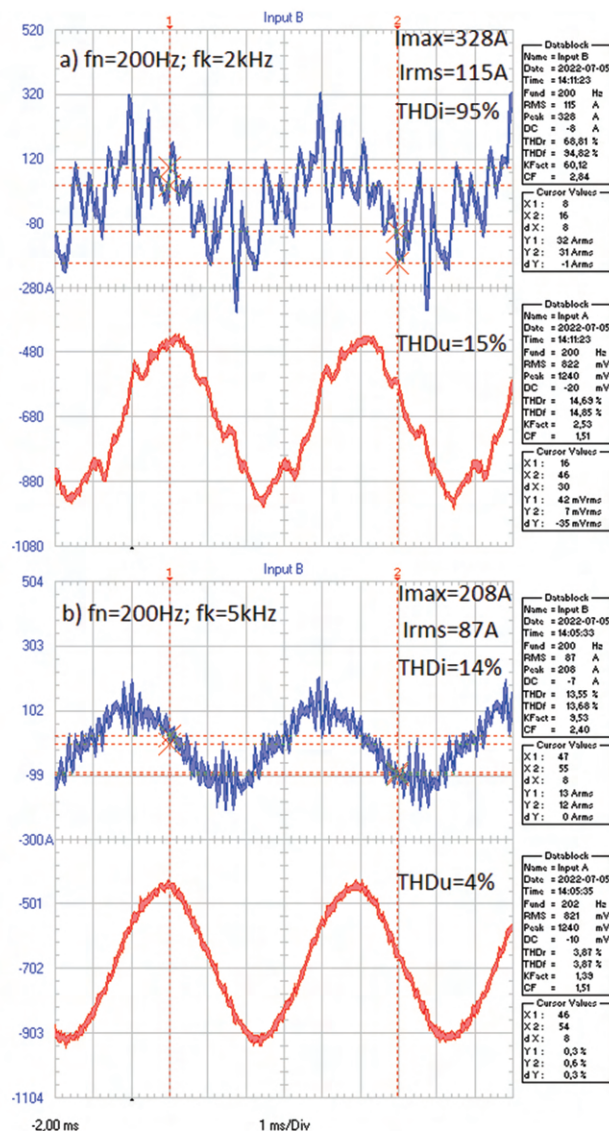


Rys. 3. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe filtru LC w przypadku różnych częstotliwości rezonansowych [2]



#### 4. Dobór częstotliwości przełączy – dlaczego warto ją zwiększyć?

Dobór częstotliwości przełączy w układach o podwyższonej częstotliwości to zagadnienie dosyć skomplikowane. Jak wykazano wcześniej zwiększanie częstotliwości przełączy poprawia współczynniki  $mf$  i THDu napięcia wyjściowego. Ma to też jednak swoje negatywne konsekwencje w postaci dodatkowych strat ciepłych w przekształtniku, dlatego producenci przekształtników niechętnie dążą do jej zwiększania.



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

Niemniej jednak w przypadku konieczności stosowania na wyjściu przekształtnika filtrów sinusoidalnych zyskujemy kolejne argumenty, aby tę częstotliwość przełączy jednak zwiększyć.

Jednym z powodów jest wartość skuteczna prądu pojemnościowego (4). Wartość tego prądu zależy nie tylko od częstotliwości podstawowej ale również od częstotliwości przełączy (Rys. 4). Im większa częstotliwość przełączy 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 filtra to również mniejsze obciążenie przekształtnika, a więc w pewnym stopniu równoważy się to ze zwiększonymi stratami dodatkowymi przekształtnika od częstotliwości przełączy. Kolejnym powodem dla którego warto zwiększać częstotliwość przełączy 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 przełączy 2 kHz i 5 kHz (Rys. 2b i 2c oraz Rys. 4a i 4b). W przypadku częstotliwości przełączy 2 kHz filtr poprawia współczynnik THDu około 3-krotnie z wartości 50% do 15%. Natomiast ten sam filtr w przypadku częstotliwości przełączy 5 kHz ogranicza THDu z 37% do niespełna 4% (czyli ponad 9-krotnie). Wpływ częstotliwości przełączy na prąd pojemnościowy oraz na odkształcenie napięcia wyjściowego filtru przedstawiony został również w Tabeli 1. Wyniki te wskazują jednoznacznie, że wyższa częstotliwość przełączy 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 przełączy, które wystąpiłyby w transformatorze, kablu i silniku.



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

$f_N$	$f_K$	Prąd pojemnościowy			THDu
		$I_{CRMS}$	$I_{CMAX}$	THDiC	
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 filtra 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 filtra. 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 dodatkowe 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 filtra oraz sprawność i wydajność całego układu.

## 6. References

- [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 harmonicznnych 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, Polska

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

