

## FILTRY HARMONICZNYCH W PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADACH NAPĘDOWYCH

Jarosław CZORNIK, Maciej HALTOF

ELHAND Transformatory Sp. z o.o.

tel.: 34 3473 132 e-mail: j.czornik@elhand.pl

tel.: 34 3473 131 e-mail: m.haltof@elhand.pl

**Streszczenie:** Światowy rynek przekształtnikowych układów napędowych należy do najbardziej dynamicznie rozwijających się. Obecnie ponad połowa energii elektrycznej zużywana przez przemysł konsumowana jest przez układy napędowe. Aktualnie coraz częściej czynnikiem decydującym o zakupie tych urządzeń jest dokładna analiza ekonomiczna i realny czas zwrotu inwestycji. Artykuł ma na celu uzmysłowienie użytkownikom przekształtnikowych układów napędowych jak duży wpływ na sprawność i energooszczędność całego układu mają filtry harmoniczných. W artykule wskazano na zależność prądu wejściowego przekształtnika od parametrów punktu przyłączeniowego i reakcji szeregowych. Omówiono negatywne oddziaływanie odkształcenia przebiegu prądu na pracę elementów magnetycznych. Przedstawiono wpływ filtru harmoniczných na parametry i pracę przekształtnikowego układu napędowego.

**Słowa kluczowe:** filtry harmoniczných, harmoniczne w układach napędowych, przekształtnikowe układy napędowe.

### 1. WPROWADZENIE

Konieczność regulacji prędkości obrotowej oraz łagodnego rozruchu silników elektrycznych istnieje praktycznie od początku ich powstania, czyli od ponad 150 lat. Na przestrzeni tego okresu nastąpił niesamowity rozwój zarówno silników jak i różnych metod regulacji prędkości obrotowej. Wprowadzono normalizację i parametryzację rozwiązań co zmieniło podejście do projektowania i optymalizacji maszyn elektrycznych. Do rewolucji przyczyniły się przede wszystkim metody numeryczne, gwałtowny rozwój sprzętu komputerowego i oprogramowania, a także duży postęp w obszarze materiałów czynnych i izolacyjnych. Regulacja prędkości obrotowej poprzez rezystory i dławiki regulacyjne czy układy Leonarda została wyparta przez rozwój półprzewodników i nowoczesne układy przekształtnikowe. Współczesne układy napędowe nie są całkowicie pozbawione wad, nadal są mocno rozwijane. Pogłębiana jest wiedza o występujących w nich zjawiskach elektromagnetycznych, mechanicznych, cieplnych, akustycznych i innych. Jednak największym wyzwaniem wciąż wydaje się być odwieczny konflikt, a zarazem potrzeba kompromisu pomiędzy energooszczędnością a materiałooszczędnością danego rozwiązania. Już dawno minęły czasy, gdzie standardem były zapasy konstrukcyjne. Dlatego dziś Komisja Europejska regularnie przygotowuje i wprowadza konkretne

przepisy i wymagania dla poszczególnych grup urządzeń (np. EN 50598-2 lub Rozporządzenie UE nr 548/2014 - Dyrektywa EcoDesign). Zapisy te określają przede wszystkim minimalne wymagania w zakresie sprawności poszczególnych maszyn i urządzeń. Ma to uchronić przed zbyt „oszczędnym” projektowaniem urządzeń oraz poprawić efektywność energetyczną systemu i przemysłu.

### 2. ZALEŻNOŚĆ PRĄDU WEJŚCIOWEGO PRZEKSZTAŁTNIKA OD PARAMETRÓW PUNKTU PRZYŁĄCZENIOWEGO

Punkt przyłączeniowy (PCC – Point of Common Coupling) może być traktowany jako źródło napięcia sinusoidalnego lub jako sieć elektroenergetyczna z określoną impedancją wewnętrzną o charakterze indukcyjnym. Wyznacznikiem, który w sposób bezpośredni wiąże zależność prądu wejściowego przyłączonego przekształtnika od parametrów w punkcie przyłączenia jest współczynnik zwarciowej sieci:

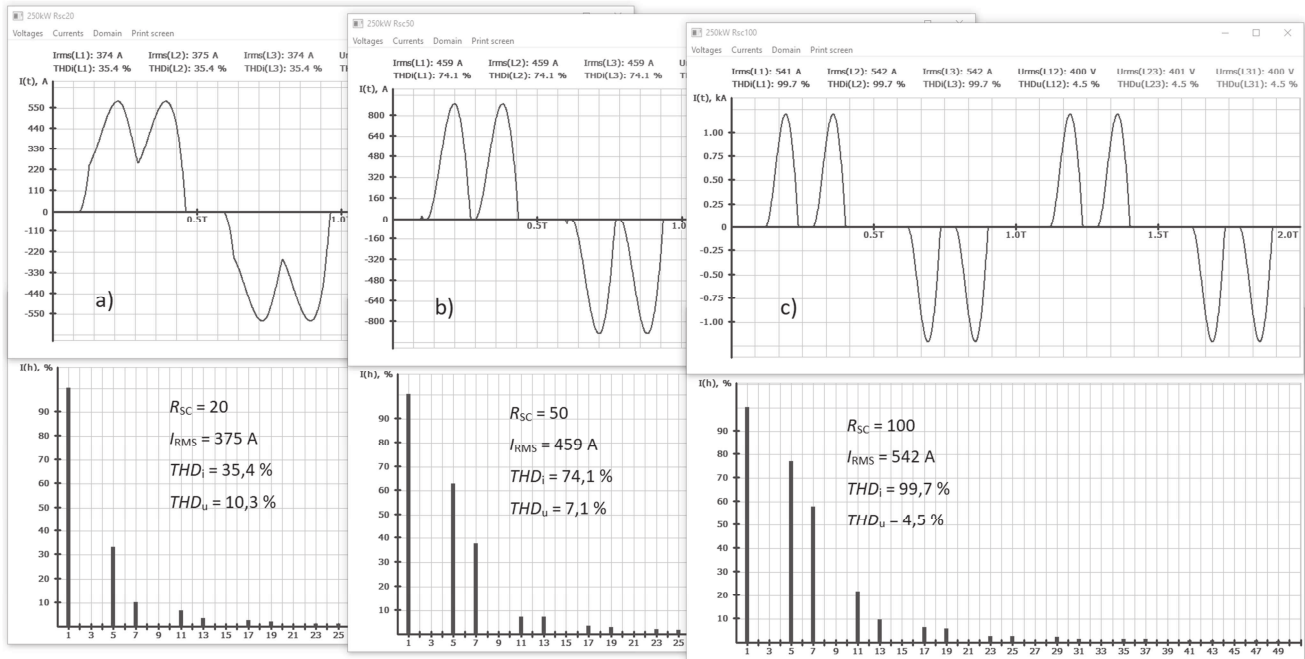
$$k_{SC} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (1)$$

gdzie:

$I_{SC}$  – prąd zwarciowej w punkcie przyłączenia,

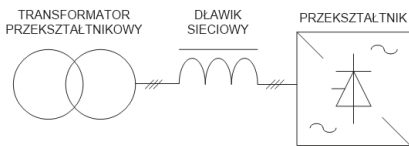
$I_L$  – prąd obciążenia w punkcie przyłączenia.

Współczynnik zwarciowej sieci oznaczany jest również jako  $R_{SC}$  (ang. ratio of short circuit), określa on sztywność punktu przyłączeniowego w stosunku do zasilanych odbiorników. Generalnie im większy stosunek mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia do mocy zasilanego przekształtnika, tym sieć bardziej sztywna, a prąd pobierany z sieci przez przekształtnik bardziej odkształcony, o większej wartości skutecznej. Na rysunku 1 zobrazowaną tą zależność w sieci z przekształtnikiem o mocy znamionowej 250kW. Aby ograniczyć odkształcenie THD<sub>i</sub> i wartość skuteczną prądu wejściowego przekształtnika należy ograniczyć prąd zwarciowej w punkcie przyłączenia. Ingerencja w moc zwarciowej punktu przyłączeniowego jest kosztowna i zasadniczo możliwa tylko na etapie projektu sieci. W praktyce najczęściej spotykanym i najprostszym sposobem ograniczenia (w pewnym zakresie) odkształcenia przebiegu prądu jest zwiększenie impedancji pętli zwarcia układu napędowego poprzez zastosowanie dodatkowych reakcji szeregowych po stronie wejściowej



Rys. 1. Przebiegi czasowe i widmo prądu wejściowego przekształtnika 6-pulsowego 250kW w przypadku różnych mocy zwarcia w punkcie przyłączenia; a)  $S_{TR}=315\text{kVA}$ ,  $u_X=6\%$ ; b)  $S_{TR}=1000\text{kVA}$ ,  $u_X=6\%$ ; c)  $S_{TR}=2500\text{kVA}$ ,  $u_X=6\%$

przekształtnika (np.: transformator przekształtnikowy z odpowiednim napięciem zwarcia lub dławik sieciowy o określonej indukcyjności, rysunek 2).



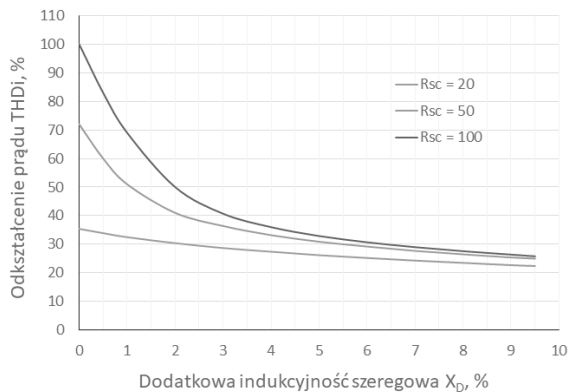
Rys. 2. Układ przekształtnikowy z dodatkowymi reaktancjami szeregowymi [1]

Względna impedancja takiego układu wynosi:

$$z \cong \frac{I_N \times (X_{TR} + X_D) \times \sqrt{3}}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$I_N$ ,  $U_N$  – prąd i napięcie znamionowe,  
 $X_{TR}$ ,  $X_D$  – reaktancja transformatora, dławika.



Rys. 3. Wpływ dodatkowej reaktancji szeregowej na odkształcenie prądu wejściowego przekształtnika

Znaczenie impedancji szeregowej obwodu jest ogromne. Wpływ dodatkowych reaktancji w torze prądowym zasilania przekształtnika przedstawiono na rysunku 3. Prawdłowo dobrany transformator przekształtnikowy i dławiki szeregowe ograniczają w pewnym stopniu oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą i inne odbiorniki, ale jest to tylko niezbędne minimum. Nawet stosowanie 5-6% dodatkowej reaktancji szeregowej ograniczy całkowity współczynnik odkształcenia  $THD_i$  prądu tylko do około 35%. Stosowanie większych impedancji szeregowych nie jest praktykowane ze względu na duże spadki napięcia, a tym samym spadek mocy układu napędowego [1].

### 3. WPŁYW ODKSZTAŁCENIA PRZEBIEGU PRĄDU WEJŚCIOWEGO PRZEKSZTAŁNIKA NA PRACĘ ELEMENTÓW MAGNETYCZNYCH

Odkształcenie prądu wejściowego przekształtnika bardzo niekorzystnie wpływa na pracę wszystkich elementów magnetycznych, które go zasilają oraz innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci. Ilościowy wzrost strat mocy w transformatorach i dławikach w zależności od zawartości harmonicznych w prądzie obciążenia można obliczyć, wyznaczając współczynniki strat dodatkowych i strat całkowite [2,3,4]:

a) współczynnik strat dodatkowych od wzrostu wartości skutecznej prądu:

$$F_i^2 = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{I_{NRMS}}{I_1}\right)^2 \quad (3)$$

gdzie:

$I_h$  – wartość prądu harmonicznej rzędu  $h$ ,  
 $I_1$  – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej,  
 $h$  – numer harmonicznej.

b) współczynnik strat wiroprądowych w uzwojeniach (K-factor):

$$F_w = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \quad (4)$$

c) współczynnik strat wiroprądowych w połączeniach i częściach konstrukcyjnych (ang. stray losses):

$$F_p = F_k = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0,8} \quad (5)$$

Całkowite straty obciążeniowe w transformatorze  $P_C$ , przy przepływie w uzwojeniach prądu odkształconego wynoszą:

$$P_C = P_p \times F_t^2 + P_w \times F_w + P_{dk} \times F_k + P_{do} \times F_p \quad (6)$$

gdzie:

$P_p$  – straty podstawowe,  $P_w$  – straty wiroprądowe w uzwojeniach,  $P_{dk}$  – straty dodatkowe w częściach konstrukcyjnych,  $P_{do}$  – straty dodatkowe w odplywach.

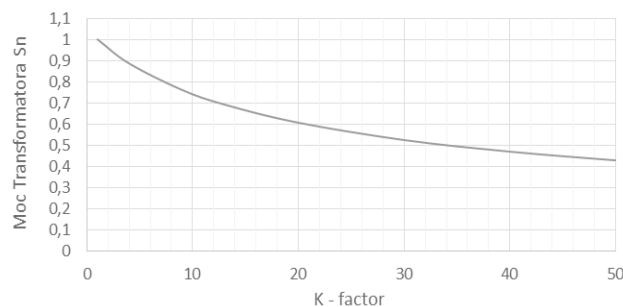
W przypadku dławików straty całkowite  $P_C$  należy uzupełnić o jeszcze jedną, bardzo istotną składową strat dodatkowych  $P_{FF}$  (ang. fringing flux), która reprezentuje straty skojarzone ze strumieniem rozproszenia wokół szczelin niemagnetycznych w rdzeniu dławikowym. Wartość tej składowej można minimalizować poprzez stosowanie rdzeni wieloszczelinowych lub wprowadzanie w szczelinę materiału magnetycznego o bardzo niskiej przenikalności  $\mu_r$ .

Odształcenie prądu obciążenia powoduje, że straty dodatkowe w elementach magnetycznych mogą wzrosnąć nawet kilkakrotnie (tab. 1).

Tabela 1. Wpływ odkształcenia prądu na straty dodatkowe w elementach magnetycznych

	Rsc 100	Rsc 50	Rsc 20	Filtr pasywny
THD <sub>i</sub>	99,7%	74,2%	35,4%	5%
$F_t^2$	1,99	1,55	1,12	1,01
$F_w (Kfactor)$	43,9	20,8	5,53	1,19
$F_p = F_k$	5,23	3,21	1,49	1,01

Podwyższone straty to w konsekwencji wzmoczone wydzielanie ciepła i wzrost temperatury pracy urządzeń, a w rezultacie skrócenie żywotności, czy nawet ich zniszczenie. W wyniku tego elementy magnetyczne do współpracy z prądami odkształconymi muszą być cieplnie przewymiarowane zależnie od stopnia odkształcenia prądu (większy przekrój rdzenia, drutu nawojowego lub taśmy nawojowej, stosowanie przepłotów uzwojenia, itd.), ewentualnie ich moc znamionowa musi zostać ograniczona. Szacunkowego przeznaczenia mocy można dokonać na podstawie współczynnika K-factor (rysunek 4), który ma największy udział jeżeli chodzi o straty dodatkowe. Należy jednak pamiętać, że nie ograniczymy w ten sposób ani podstawowych, ani dodatkowych strat mocy. Przeciwdziałamy jedynie ich skutkom kosztem większego i droższego urządzenia. Tylko ograniczenie wyższych harmonicznych w widmie prądu do odpowiednio niskiego poziomu pozwoli zredukować straty dodatkowe. To z kolei poprawia sprawność całego układu.



Rys. 4. Stopień przeznaczenia mocy transformatora w zależności od współczynnika K-factor

#### 4. METODY ELIMINACJI ORAZ DOPUSZCZALNE POZIOMY EMISJI HARMONICZNYCH PRĄDU

Istnieje wiele metod eliminacji i ograniczania harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtników. Począwszy od prostych dławików AC i DC, układów wielopulsowych, filtrów pasywnych i na skomplikowanych układach aktywnych kończąc. Każda z technik filtrowania charakteryzuje się różną skutecznością tłumienia harmonicznych, różnymi stratami, różnymi kosztami zakupu i eksploatacji (tab. 2).

Tabela 2. Porównanie skuteczności i względnych kosztów różnych metod eliminacji harmonicznych prądu

Metoda ograniczania harmonicznych prądu	Odształcenie prądu (THD <sub>i</sub> )	Względny koszt
Układy bez filtracji	60 – 120 %	1
2% dławiki AC lub DC	30 – 60 %	2
4% dławiki AC lub DC	25 – 45 %	3
Układy 12-pulsowe	10 – 15 %	4
<b>Filtry pasywne</b>	<b>5 – 8 %</b>	<b>4</b>
Układy 18-pulsowe	4 – 6 %	5
Filtry aktywne	3 – 5 %	5

Dławiki AC oraz DC są najtańszą metodą ograniczenia wartości skutecznej prądu sieciowego oraz pewnej redukcji harmonicznych w prądzie zasilania (w zależności od reaktancji dławika) – niestety jest to dziś niewystarczające minimum, które nie spełnia obowiązujących obecnie standardów.

W układach wielopulsowych dzięki przesunięciom fazowym pomiędzy uzwojeniami wtórnymi transformatora (dwa uzwojenia wtórne w przypadku układu 12-pulsowego, trzy uzwojenia wtórne w układzie 18-pulsowym) i zastosowaniu odpowiedniej liczby prostowników eliminujemy harmoniczne 5h i 7h (w układzie 12-pulsowym) oraz dodatkowo 11h i 13h (w układzie 18-pulsowym). Główną wadą układów wielopulsowych jest ich wrażliwość na niesymetrię obciążenia oraz nierównowagę lub odkształcenie napięcia zasilania. Wówczas nie jest możliwe skuteczne ograniczenie harmonicznych (5,7 oraz 11 i 13). Powoduje to, że THD<sub>i</sub> prądu wzrasta powyżej zakładanych wartości co w wielu przypadkach może prowadzić do niespełnienia zakładanych parametrów.

Filtry zarówno pasywne, jak i aktywne są częściowo odporne na niesymetrię napięcia zasilającego, a ich właściwości tłumienne pozwalają na spełnienie

Tabela 3. Dopuszczalne limity odkształcenia harmonicznego prądu dla wszystkich urządzeń w punkcie przyłączenia w zależności od  $I_{SC} / I_L$  według IEEE 519-2014

$I_{SC}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq 50$	$THD_i$
$< 20$	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	5%
$20 < 50$	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%
$50 < 100$	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%
$100 < 1000$	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%
$> 1000$	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%

Tabela 4. Dopuszczalne limity harmonicznych napięcia w punkcie przyłączenia według IEEE 519-2014

Napięcie w punkcie PCC	Indywidualne harmoniczne	$THD_u$
$U \leq 1kV$	5,0%	8,0%
$1kV < U \leq 69kV$	3,0%	5,0%
$69kV < U \leq 161kV$	1,5%	2,5%
$161kV < U$	1,0%	1,5%

restrykcyjnych norm napięcia i prądu w punkcie przyłączenia. Przewagą filtrów aktywnych jest utrzymywanie niskiego poziomu  $THD_i$  prądu w pełnym zakresie obciążenia, ale ma to bezpośrednie odzwierciedlenie w cenie zakupu takiego urządzenia.

Dzisiaj nie trzeba nikogo przekonywać, że ograniczanie czy eliminacja harmonicznych jest koniecznością. Pozostaje jednak wątpliwość jaką metodę wybrać i jakie standardy powinniśmy spełniać aby uniknąć niepotrzebnych problemów i kosztów. Obecne uregulowania normatywne i rozporządzenia w zakresie emisji harmonicznych dotyczą przede wszystkim harmonicznych napięcia w punkcie przyłączenia (EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-4), a rzadziej w prądzie (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12) [5]. Należy jednak pamiętać, że zniekształcenie napięcia jest powodowane właśnie przez harmoniczne w prądzie pobieranym przez nieliniowe odbiorniki. Dlatego coraz częściej spotyka się wymagania ograniczenia poziomu emisji harmonicznych zarówno prądu jak i napięcia w punkcie przyłączenia zgodnie z normą IEEE 519-2014 [6]. Jest to standard obejmujący swoim zakresem wszystkie sieci, poziomy napięcie oraz prądów w punkcie przyłączenia (tab. 3, tab. 4). Stosowanie dopuszczalnych limitów odkształcenia harmonicznego prądu i napięcia już na wczesnym etapie projektowania systemów zasilania energii elektrycznej i odbiorów nieliniowych, pozwala na stabilną oraz przewidywalną pracę układu na przestrzeni całego

okresu eksploatacji.

## 5. FILTRY HARMONICZNYCH – SPRAWNOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ UKŁADU NAPĘDOWEGO

Sprawność maszyny elektrycznej to stosunek mocy oddawanej przez tą maszynę ( $P_{OUT}$ ) do mocy przez nią pobieranej ( $P_{IN}$ ). W ten sposób można wyznaczyć całkowite straty mocy maszyny. Podobnie jest w przypadku określania sprawności i strat przekształtnikowych układów napędowych. Jednak tutaj zagadnienie to staje się bardziej złożone, ponieważ układy te składają się zazwyczaj z kilku maszyn i urządzeń, które dodatkowo są względem siebie zależne. Przykładowo, sprawność układu na rysunku 5 możemy wyznaczyć w następujący sposób:

$$\eta_{Drive System} = \frac{P_{Out}}{P_{In}} = \frac{P_{Out}}{P_{Out} + dP_{Total Losses}} \quad (7)$$

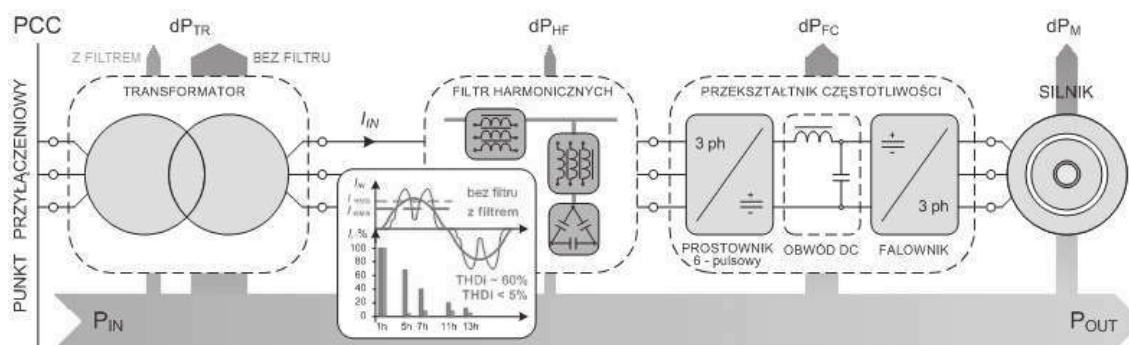
gdzie:

$$dP_{Total Losses} = dP_{Tr} + dP_{HF} + dP_{FC} + dP_M \quad (8)$$

lub w postaci sprawności:

$$\eta_{Drive System} = \eta_{Tr} \times \eta_{HF} \times \eta_{FC} \times \eta_M \quad (9)$$

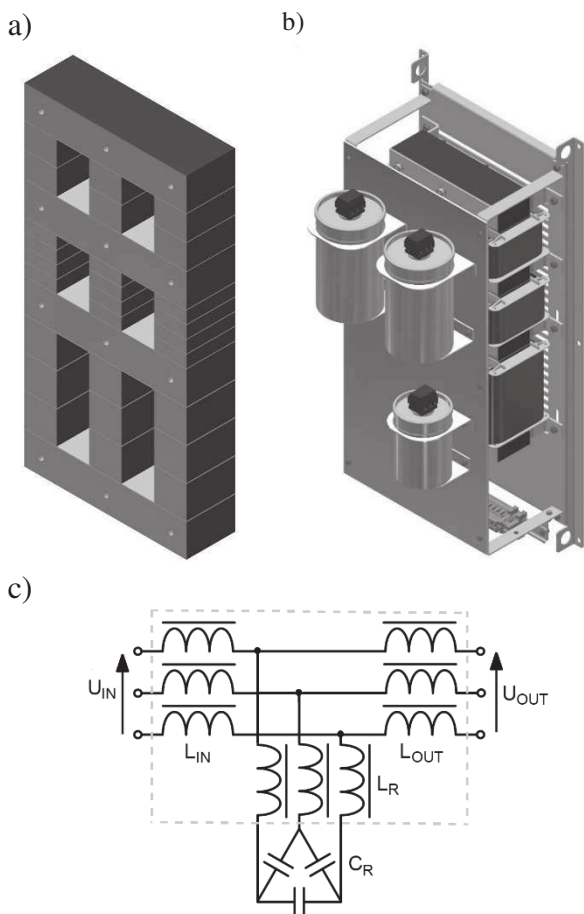
Całkowita sprawność układu napędowego jest iloczynem sprawności poszczególnych jego elementów począwszy od punktu przyłączeniowego (PCC) lub rozliczeniowego. W praktyce jednak często zagadnienie sprawności przekształtnikowego układu napędowego rozpatrywane jest błędnie, bez uwzględnienia oddziaływania przekształtnika na transformator, sieć i inne odbiorniki. Obniża to jakość zasilania i efektywność energetyczną całego systemu. Aby tego uniknąć każdy przekształtnik powinien być odseparowany i wyposażony w urządzenie



Rys. 5. Rozpływ strat mocy w typowym przekształtnikowym układzie napędowym w układzie z filtrem oraz bez filtra harmonicznych [7]

ograniczające emisję harmoniczną do sieci zasilającej.

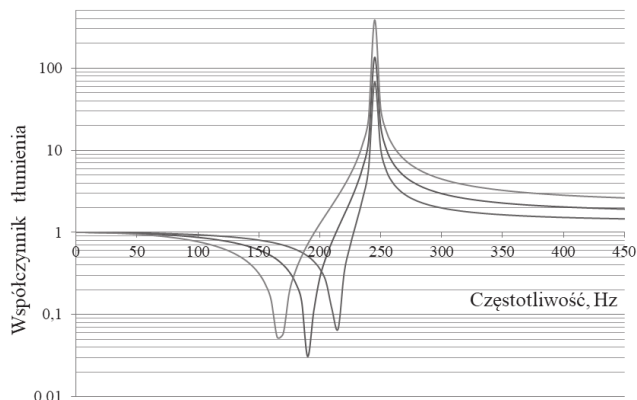
Ze względu na wysoką tłumienność i sprawność pasywne filtry harmoniczne stanowią optymalną alternatywę (skuteczność filtracji do kosztu aplikacji) w stosunku do pozostałych metod eliminacji harmonicznych w prądzie wejściowym układów przekształtnikowych (tab. 2). Skuteczność filtracji pasywnych filtrów harmonicznych jest zbliżona do układów 18-pulsowych, a zależność tłumienności od poziomu obciążenia i nierównoważenia napięcia zasilania jest mniejsza niż w układach wielopulsowych. Obecne filtry pasywne to już nie tylko dostrojona do pojedynczej harmonicznej kombinacja dławika i kondensatora. Coraz częściej to zaawansowane połączenie zespołu dławików i kondensatorów do tłumienia określonego zakresu harmonicznych. Standardem stają się kompaktowe rozwiązania wielodławikowe, wykonane na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym (rysunek 6) [7].



Rys. 6. Filtr harmoniczny EF3H 55kW: a) budowa rdzenia wielodławikowego o wspólnych jarzmach; b) kompaktowa konstrukcja filtra harmonicznego; c) schemat ideowy filtra [7]

Konstrukcja wspólnego rdzenia magnetycznego (wspólne jarzma) w filtrze wielodławikowym przyczynia się do ograniczenia gabarytów i masy urządzenia. Indukcyjności poszczególnych dławików pozwalają odpowiednio kształtować charakterystykę tłumienności filtra (rysunek 7). Dławik równoległy wraz z baterią kondensatorów tworzy pułapkę rezonansową na określonej harmonicznej. Dławiki szeregowe (wejściowy i wyjściowy) wpływają na szerokość pasma tłumienia oraz wstępne ograniczenie harmonicznych wyższego rzędu. Indukcyjności dławików i pojemności kondensatorów są tak dobierane, aby filtr osiągał odpowiednią tłumienność w szerokim zakresie obciążenia. Istotnym parametrem jest również pobór prądu

pojemnościowego przy braku obciążenia albo przy niewielkich obciążeniach. Konstrukcja i optymalizacja parametrów filtrów wielodławikowych pozwala na obniżenie prądu pojemnościowego nawet poniżej  $I_C < 15\%I_N$  prądu znamionowego.



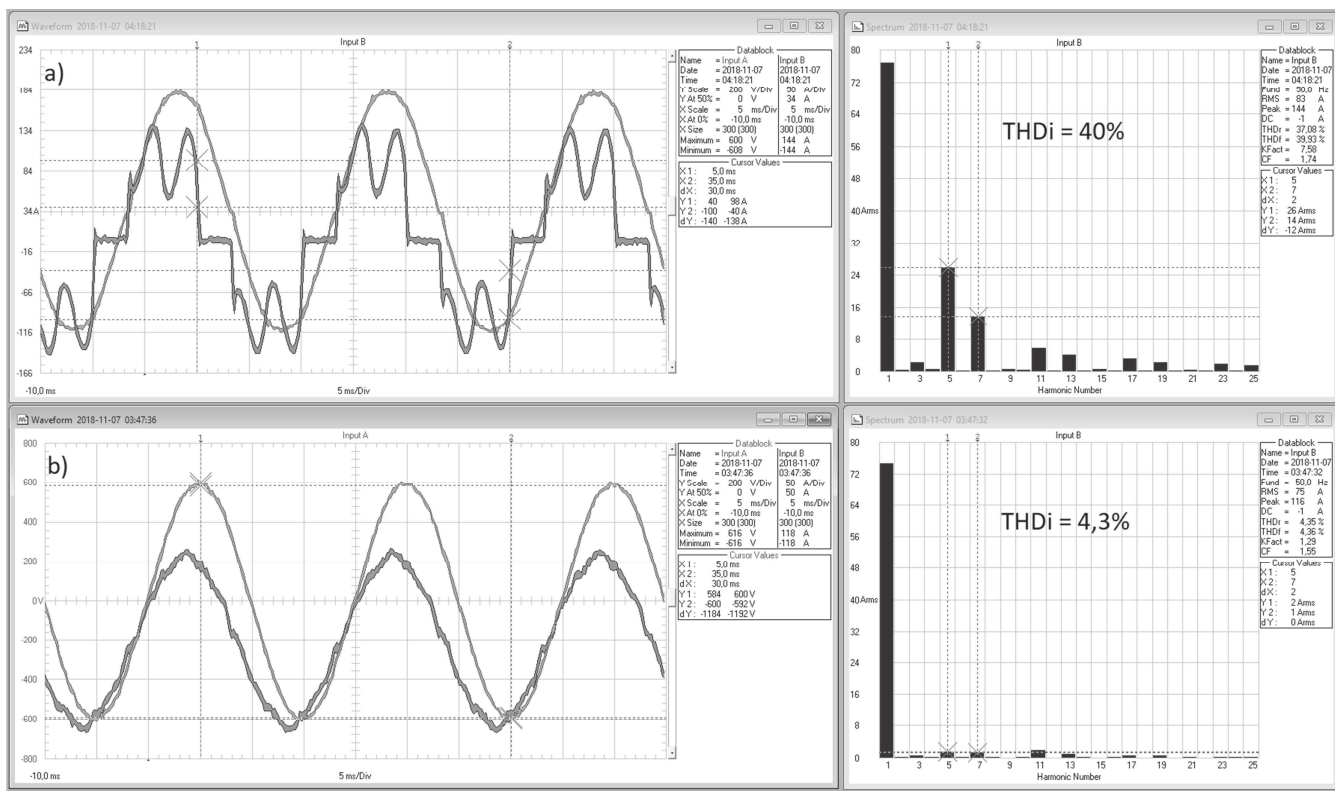
Rys. 7. Przykładowe charakterystyki tłumienności filtra wielodławikowego

W oparciu o typowe moce układów przekształtnikowych powstają odpowiadające im rodziny filtrów harmonicznych, które spełniają wymagania tłumienności zgodnie ze standardem IEEE 519-2014 bez względu na parametry punktu przyłączeniowego.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki pomiarów zawartości harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtnika 55kW w układzie bez filtra oraz w układzie z wielodławikowym filtrem harmonicznym EF3H-55kW 380-415V±10% T40F. Zastosowanie filtra harmonicznych w układzie zasilania przepompowni pozwoliło obniżyć THD<sub>i</sub> w prądzie z wartości 40% do poziomu poniżej 4,5%, eliminując tym samym negatywne oddziaływanie prądu odkształconego na pozostałe odbiorniki w sieci.

## 6. PODSUMOWANIE

Oddziaływanie układów przekształtnikowych na sieć to zagadnienie bardzo obszerne, nadal aktualne i narastające. Wymusza to na ustawodawcach wprowadzanie uregulowań normatywnych, które pomagają utrzymać jakość energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. Transformatory przekształtnikowe czy dławiki szeregowe nie rozwiązują wszystkich problemów i nie są w stanie ograniczyć emisji harmonicznych prądu do odpowiednio niskiego poziomu. Prawidłowa analiza zawartości harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtnika ma szczególne znaczenie w doborze i bilansowaniu cieplnym elementów magnetycznych z nim współpracujących. Przewymiarowane transformatory to marnotrawstwo energii – rozsądniej zredukować harmoniczne niż przeciwdziałać ich skutkom. Rosnąca świadomość klientów oraz zapotrzebowanie na urządzenia do redukcji harmonicznych sprawiają, że pasywne filtry harmonicznych są nadal mocno rozwijane i optymalizowane, co zwiększa ich konkurencyjność. Zastosowanie filtrów harmonicznych nie tylko przyczynia się do obniżenia kosztów energii elektrycznej ale również w znaczący sposób poprawia wydajność i niezawodność przekształtnikowego układu napędowego.



Rys. 8. Wyniki pomiaru harmonicznych prądu wejściowego przekształtnika 55kW; a) w układzie bez filtra harmonicznych; b) w układzie z filtrem trój-dławikowym na wspólnych jarmach EF3H-55kW 380-415V±10% T40F [7]

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Czornik J., Łukiewski M.: Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych – *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2015, s. 51-58.
2. Wolnik P., Sobota J.: Wpływ występowania wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia transformatora dystrybucyjnego na sposób jego eksploatacji. Konferencja – Zarządzanie eksploatacją transformatorów, Wisła – Jawornik 2012r., s. 99-107.
3. Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M.: Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, Nr 89/2011, s. 139-147.
4. PN-EN 61378-1:2000 „Transformatory przekształtnikowe. Transformatory do zastosowań przemysłowych”.
5. Pozowski A.: Nowe trendy ochrony sieci zasilających przed wyższymi harmonicznymi prądu i napięcia przy zasilaniu z przemienników częstotliwości. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, Nr 79/2008, s. 57-62.
6. IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
7. Materiały i opracowania własne – Elhand Transformatory Sp. z o.o., Lubliniec.

### Informacje dodatkowe:

Artykuł zrealizowano w ramach RPO WSL 2014-2020: *"Nowoczesne, energooszczędne układy przetwarzania energii elektrycznej wolne od harmonicznych generowanych przez przekształtniki mocy"* - WND-RPSL.01.02.00-24-0548/17.



PROGRAM REGIONALNY  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Śląskie.  
Pozytywna energia

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI FUNDUSZ  
ROZWOJU REGIONALNEGO



## HARMONIC FILTERS IN CONVERTER DRIVE SYSTEMS

The world market of converter drive systems is one of the most dynamically developing markets nowadays. Today, over half of the globally used electric energy is consumed by drive systems. A thorough economic analysis as well as the real return on investment are increasingly becoming a decisive factor for the purchase of those devices. The objective of this article is to make users of converter drive systems aware of the significant influence the harmonic filters have on the efficiency of the entire system. Dependency of the converter input current on parameters of the point of common coupling and serial reactances have been shown. The work also depicts negative impact of current wave deformations on magnetic components. The impact of harmonic filters on parameters and operation of the converter drive system have been presented.

**Keywords:** harmonic filters. harmonics in drive systems. converter drive systems.