

Jarosław Czornik, Mirosław Łukiewski
ELHAND TRANSFORMATORY Sp. z o.o., Lubliniec

FILTRY HARMONICZNYCH GWARANCJĄ KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ ORAZ WYSOKIEJ SPRAWNOŚCI PRZEKSZTAŁNIKOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

HARMONIC FILTERS – A GUARANTEE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND HIGH EFFICIENCY OF THE CONVERTER DRIVE SYSTEMS

Streszczenie: Artykuł przedstawia zagrożenia i straty związane z występowaniem harmonicznych w prądzie zasilającym przekształtniki z wejściem 6-pulsowym. Wskazuje skuteczny i ekonomiczny sposób ich ograniczenia za pomocą właściwego doboru filtrów harmonicznych ElhandHF, zapewniających kompatybilność całego układu napędowego zgodnie ze standardami IEEE 519 i EN 61000. Opisane filtry zostały zaprojektowane, wykonane i przetestowane w rzeczywistych warunkach, a rezultatem tych prac są typoszeregi filtrów przeznaczonych do typowych układów napędowych. Filtry te pozwalają zachować wysoką jakość napięcia sieci zasilającej, redukują straty mocy, a tym samym koszty eksploatacji oraz zwiększają niezawodność i sprawność przekształtnikowych układów napędowych. W artykule przedstawiono także korzyści wynikające z zastosowania w filtrach rdzeni wieloszczelinowych wykonanych w innowacyjnej i niskostratnej technologii ElhandCutCore.

Abstract: This article presents the dangers and losses resulting from the presence of harmonic currents in the electrical network supplying inverters with 6-pulse input. It points out the effective and efficient method for elimination of the harmonic currents with the use of well-chosen ElhandHF filters providing for the compatibility of the whole system according to IEEE519 and EN61000 standards. The described filters were designed, made and tested in a real system and the result of the research is a series of filter types intended for typical drive systems. The filters provide for a high quality of the supply voltage, they reduce the power losses and at the same time the operation costs, as well as increase the reliability and efficiency of the inverter drive systems. This article presents also the advantages resulting from the application of multi-gap cores, made according to the innovative and low-loss ElhandCutCore technology, in filters.

Słowa kluczowe: filtry harmonicznych, kompatybilność elektromagnetyczna, rdzenie wieloszczelinowe
Keywords: harmonic filters, harmonics, electromagnetic compatibility, multi-gap cores

1. Wprowadzenie

Jakość energii elektrycznej to zagadnienie bardzo obszerne, obejmujące wiele szczegółowych problemów technicznych. Tematyka jakości energii jest sprawą ważną, a jej znaczenie ciągle wzrasta, ponieważ koszty złej jakości energii ponosimy wszyscy. Niska jakość zasilania przynosi straty zarówno energetyce, przemysłowi jak i odbiorcom indywidualnym. Przyczynia się do tego dynamiczny rozwój energoelektroniki oraz powszechne stosowanie przekształtników mocy, przetwornic częstotliwości, UPS-ów i innych odbiorników nieliniowych. Coraz większą grupę odbiorników stanowią układy napędowe, gdzie funkcję regulowanego źródła zasilającego pełni przetwornica częstotliwości z wejściem 6-pulsowym. Jest to obecnie najprostsze i najczęściej spotykane rozwiązanie, powodujące jednak wiele zakłóceń

i zaburzeń pola elektromagnetycznego. Największy problem stanowią harmoniczne prądów (generowane przez wejście 6-pulsowe), ponieważ to one wywołują większość negatywnych skutków w systemie elektrycznym. Dlatego stosując tego typu rozwiązania należy zwrócić szczególną uwagę na ich kompatybilność elektromagnetyczną, tak aby uniknąć nieplanowanych awarii, zwiększonych opłat za energię elektryczną lub generowanie zakłóceń do sieci i innych odbiorników. Poniższe opracowanie ma na celu wskazanie prawidłowego i optymalnego doboru elementów magnetycznych oraz zwiększenia sprawności całego układu napędowego.

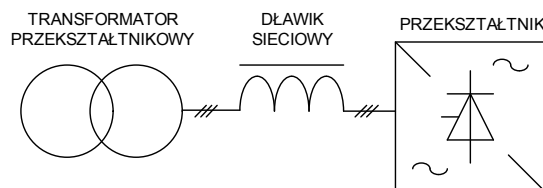
2. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych

Coraz częściej wśród wymagań dla przekształtnikowych układów napędowych pojawiają się ograniczenia poziomu emisji harmonicznych w punkcie przyłączenia. Uregulowania normowe i obowiązujące rozporządzenia w tym zakresie dotyczą przede wszystkim granicznych wartości dla harmonicznych napięcia i dla całkowitego współczynnika zniekształceń napięcia THDu w punkcie przyłączenia (EN 61000-2-2, EN 61000-2-4). Należy jednak pamiętać, że to pobór odkształconego prądu z sieci elektrycznej powoduje odkształcenie napięcia zasilającego, co ma negatywny wpływ na pracę całego systemu elektroenergetycznego i zasilanych z niego odbiorników. Dlatego rosnące wymagania odnośnie jakości energii elektrycznej i kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń spowodowały, że coraz częściej można spotkać wymagania normowe, które ograniczają poziom emisji harmonicznych prądu i współczynnik zniekształceń prądu THDi pobieranego z sieci (EN 61000-3-2, EN 61000-3-12). Obecnie najbardziej restrykcyjne wymagania w tym zakresie są zawarte w zaleceniach IEEE 519 obowiązujących w USA (Tabela 1.) i tylko kwestią czasu jest wprowadzenie obowiązku takich ograniczeń w Polsce. Zaostrożenie przepisów określających poziom odkształceń napięcia i prądu w punkcie przyłączenia jest dzisiaj koniecznością. Ponieważ tylko w ten sposób, przy rosnącej liczbie odbiorników nieliniowych, można utrzymać jakość energii elektrycznej na odpowiednim poziomie oraz ograniczyć niepotrzebne straty mocy czynnej, które w sposób bezpośredni wpływają

na cenę energii, a tym samym na koszty produkcji.

3. Znaczenie impedancji szeregowych przy zasilaniu układów 6-pulsowych

Pobór prądów harmonicznych przy zasilaniu układów 6-pulsowych (5h, 7h, 11h, 13h, ...) jest różny w zależności od impedancji zwarcia w punkcie przyłączenia oraz elementów indukcyjnych występujących w torze prądowym.



Rys. 1. Schemat typowego układu przekształtnikowego

Względna impedancja takiego układu wynosi:

$$Z[\%] \cong \frac{I_N \times (X_{TR} + X_D) \times \sqrt{3}}{U_N} \times 100 \quad (1)$$

gdzie:

I_N, U_N – prąd i napięcie znamionowe

X_{TR} – reaktancja transformatora

X_D – reaktancja dławika

To właśnie od wypadkowej impedancji całego obwodu zasilania zależą wartości poszczególnych harmonicznych prądu oraz całkowity współczynnik odkształceń THDi. W wielu przypadkach moc transformatora zasilającego jest wielokrotnie większa od mocy zasilanego odbiornika, a to oznacza, że impedancja transformatora jest dla tego obciążenia proporcjonalnie wielokrotnie mniejsza.

Tabela 1. Dopuszczalne limity odkształcenia harmonicznych prądu dla wszystkich urządzeń w punkcie przyłączenia w zależności od I_{SC} według IEEE 519

I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi
< 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%

I_{SC} – maks. prąd zwarciovowy w punkcie przyłączenia; I_L – maks. prąd obciążenia w punkcie przyłączenia

Przykład: Transformator 1000kVA o względnej impedancji zwarcia 6%, będzie dla obciążenia 100kVA stanowić tylko 0,6% impedancji. Dodatkowo gdyby obciążeniem tym był np. przekształtnik nie pracujący z pełną mocą, to rzeczywista efektywna impedancja zwarcia „widziana” przez ten przekształtnik będzie jeszcze mniejsza, a ograniczenie harmonicznych niewielkie (Tab. 2). Jak pokazano w powyższym przykładzie znaczenie rzeczywistej impedancji obwodu jest ogromne, a prawidłowa analiza zawartości harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtnika ma szczególne znaczenie przy doborze i wymiarowaniu cieplnym elementów magnetycznych z nim współpracujących. Często wśród użytkowników takich układów panuje przekonanie, że każdy transformator przekształtnikowy lub dławik wejściowy rozwiąże wszystkie problemy związane z występowaniem harmonicznych, ale jak się okazuje niestety tak nie jest. Prawidłowo dobrany transformator przekształtnikowy czy dławik wejściowy ograniczy w pewnym stopniu oddziaływanie przekształtnika na sieć i inne odbiorniki ale jest to tylko niezbędne minimum. Nawet zastosowanie 5-cio procentowej impedancji ograniczy całkowity współczynnik THDi tylko do około 35%. Stosowanie bardzo dużych impedancji nie jest praktykowane ze względu na duży spadek napięcia, a w rezultacie spadek mocy układu.

4. Wpływ odkształcenia przebiegu prądu na pracę elementów magnetycznych

Przepływ prądów odkształconych wpływa bardzo niekorzystnie na pracę zarówno transformatorów jak i dławików. Najbardziej widoczne jest to we wzroście strat mocy, które mają bezpośredni wpływ na ciepłe warunki pracy i ży-

wotność tych urządzeń. Doskonale skalę zagrożenia opisano w materiałach [3,4,6], gdzie przedstawiono ilościowo wzrost strat obciążeniowych w transformatorach w zależności od zawartości harmonicznych w prądzie obciążenia:

- a) współczynnik strat dodatkowych od wzrostu wartości skutecznej prądu:

$$F_i^2 = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 = \left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 \quad (2)$$

gdzie:

I_h – wartość prądu harmonicznej rzędu h ,

I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej

h – numer harmonicznej

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

$$F_w = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^2 \quad (3)$$

- c) współczynnik strat wiropądowych w połączeniach i częściach konstrukcyjnych:

$$F_p = F_k = \sum_1^h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times h^{0,8} \quad (4)$$

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

$$P_C = P_p \times F_i^2 + P_w \times F_w + P_{dk} \times F_k + P_{do} \times F_p \quad (5)$$

gdzie:

P_p – straty podstawowe, P_w – straty wiropądowe w uzwojeniach, P_{dk} – straty dodatkowe w częściach konstrukcyjnych,

Tabela 2. Zniekształcenia harmoniczne prądu na wejściu układu 6-pulsowego w zależności od efektywnej impedancji zwarcia obwodu (wartości wyznaczone w środowisku SIMULINK)

Numer harmonicznej	Procentowa wartość efektywnej impedancji						
	0,5%	1%	1,5%	2%	3%	4%	5%
5h	78%	60%	51%	46%	39%	35%	32%
7h	58%	36%	28%	23%	17,5%	14,5%	12,5%
11h	18%	13%	11%	9%	7,5%	6,5%	6%
13h	10%	8%	6,5%	6%	5%	4,3%	4%
17h	7,5%	5%	4%	3,6%	3%	2,5%	2,3%
19h	6%	4%	3,3%	3%	2,3%	2%	1,8%
23h	5%	3%	2,6%	2%	1,5%	1,3%	1,1%
25h	2,3%	2%	1,6%	1,3%	1,1%	1%	0,9%
THDi	100%	72%	60%	55%	44%	39%	35%

P_{do} – straty dodatkowe w odpływach.

Powyższe zależności można stosować również w przypadku dławików. Należy jednak uwzględnić jeszcze jedną bardzo istotną składową strat dodatkowych – od strumienia rozproszenia szczeliny powietrznej P_{Ff} (Fringing flux), omówionej w punkcie 6.

Zbyt duże odkształcenie prądu obciążenia powoduje, że straty dodatkowe w elementach magnetycznych mogą wzrosnąć nawet kilkakrotnie (Tab. 3). Oznacza to zwiększone wydzielanie ciepła i wzrost temperatury ich pracy, a w efekcie skrócenie żywotności, a nawet zniszczenie. Dlatego elementy magnetyczne do współpracy z prądami odkształconymi muszą być cieplnie przewymiarowane zależnie od stopnia odkształcenia prądu, ewentualnie ich moc znamionowa musi zostać ograniczona. Szacunkowego przewymiarowania mocy można dokonać na podstawie współczynnika K-factor (Tab. 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, a jedynie przeciwdziałamy ich skutkom, kosztem większego i droższego urządzenia. Tylko ograniczenie harmonicznych prądu do odpowiednio niskiego poziomu (Tab. 1) pozwoli uniknąć przewymiarowania elementów magnetycznych i poprawi sprawność całego układu.

5. Filtry harmonicznych

Istnieje wiele metod eliminacji i ograniczania harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtników. Ale począwszy od prostych dławików szeregowych, aż po skomplikowane układy aktywne, każda z technik filtrowania ma

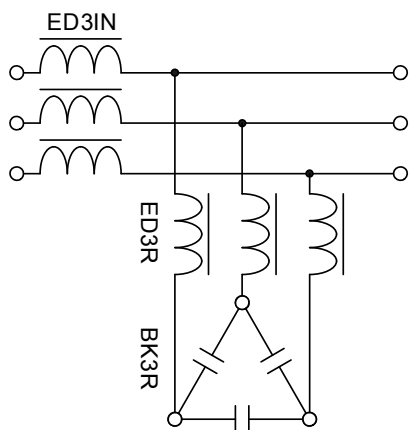
różne koszty, straty mocy i różną skuteczność tłumienia harmonicznych. Do urządzeń, które charakteryzują się bardzo dużą efektywnością tłumienia harmonicznych oraz bardzo wysoką sprawnością na pewno można zaliczyć pasywne filtry ElhandHF. Filtry te powstały w oparciu o zintegrowane połączenie indukcyjności szeregowej oraz równoległej gałęzi rezonansowej (Rys. 2). Optymalna struktura filtru i właściwe dopasowanie parametrów poszczególnych jego części pozwala skutecznie ograniczyć harmoniczne generowane przez przekształtniki, bez względu na strukturę i parametry sieci w punkcie przyłączenia. Równoległa gałąź filtru to odpowiednie zestrojenie indukcyjności i pojemności o niskiej impedancji wypadkowej dla określonej częstotliwości harmonicznej. Natomiast szeregową indukcyjność poprawia skuteczność filtrowania oraz ogranicza wpływ zakłóceń i zagrożeń powstających od strony sieci. Tłumienność filtru jest tak dopasowana, że nawet w przypadku małej impedancji sieci nie ma potrzeby stosowania dodatkowych dławików. Filtr ogranicza wartość współczynnika THDi na wejściu układu 6-pulsowego do poziomu poniżej 5%, przy pełnym obciążeniu. Straty mocy w filtrze nie przekraczają 1% w odniesieniu do mocy układu napędowego. Filtry te przewyższają inne pasywne techniki filtrowania nie tylko pod względem bardzo wysokiej sprawności ale i pod względem utrzymania niskiego współczynnika THDi w szerokim zakresie zmian obciążenia oraz przy niesymetrii napięcia zasilającego. Wysoka sprawność oraz stałość parametrów niezależnie od obciążenia została uzyskana dzięki unikalnej konstrukcji rdzeni wieloszczelinowych, która pozwoliła na stworzenie całej rodziny wysoko-sprawnych filtrów harmonicznych ElhandHF.

Tabela 3. Wpływ odkształcenia prądu na straty dodatkowe w elementach magnetycznych

Obwód wejściowy	Impedancja 1%	Impedancja 5%	Filtr HF
THDi	72%	35%	5%
F_t^2	1,51	1,12	1,01
F_w	21,5	5,42	1,42
$F_p = F_k$	3,14	1,49	1,03

Tabela 4. Stopień przynamionowania mocy w zależności od współczynnika K-factor[3]

K-factor (F_w)	K4	K9	K13	K20	K30	K40	K50
Sn x	0,886	0,761	0,692	0,606	0,524	0,469	0,428



Rys. 2. Schemat obwodowy filtra harmonicznego ElhandHF

6. Rdzenie wieloszczelinowe

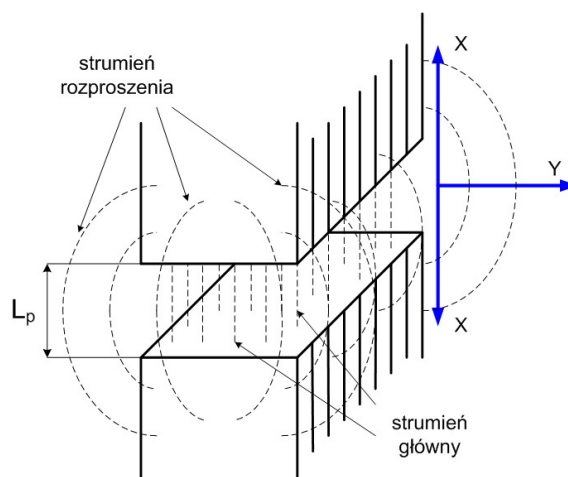
Przepływ prądu zmiennego w uzwojeniach elementów magnetycznych powoduje przepływ zmiennego strumienia magnetycznego. Główna część strumienia zamyka się w rdzeniu magnetycznym, a pozostała część w postaci strumienia rozproszenia przenika przez uzwojenia i inne elementy konstrukcyjne, generując w nich dodatkowe straty mocy. Określanie tych strat jest złożonym zagadnieniem, a sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, jeżeli mamy do czynienia z nieciągłością rdzenia w postaci niemagnetycznej szczeliny. W obszarach przyszczelinowych występuje bardzo duże rozproszenie strumienia magnetycznego (Rys. 4), a rozkład pola rozproszenia zależy przede wszystkim od wielkości szczeliny i gęstości strumienia głów-



Rys. 3. Wejściowy filtr harmonicznego ElhandHF (400kW)

nego (Rys. 5). Wypadkowa szczelina powietrzna w dużych dławikach lub filtrach dochodzi do kilku, a w niektórych przypadkach nawet kilkunastu centymetrów. Wszystko zależy od wymaganej liniowości charakterystyki magnetycznej.

W przypadku filtrów rezonansowych parametr ten ma kluczowe znaczenie, ponieważ tylko niezmienna wartość indukcyjności w pełnym zakresie prądu obciążenia, umożliwia utrzymanie stałej częstotliwości rezonansowej, a więc określonej tłumienności. Liniowość indukcyjności w szerokim zakresie prądu obciążenia wiąże się z koniecznością wprowadzenia dużej wypadkowej szczeliny niemagnetycznej. A to znacząco utrudnia zaprojektowanie optymalnego dławika o ograniczonych stratach mocy, ograniczonym hałasie i natężeniu zewnętrznego pola magnetycznego. Duże szczeliny prowadzą do zwiększenia strat mocy w obszarach przyszczelinowych zarówno w rdzeniu jak i uzwojeniach P_{FF} . Odształcony prąd, a tym samym odształcony strumień magnetyczny tylko potęgują szkodliwe zjawiska. W skrajnych przypadkach straty od rozproszenia strumienia w obszarze przyszczelinowym mogą znacząco przewyższać straty podstawowe i doprowadzić do lokalnego przegrzania urządzenia. Dokładne wyliczenie strat P_{FF} oraz analiza rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu i uzwojeniach wymaga stosowania metod elementów skończonych i jest bardzo czasochłonna. Ale tylko takie podejście do tego zagadnienia pozwoliło stworzyć technologię produkcji rdzeni wieloszczeli-



Rys. 4. Strumień główny i rozproszenia w obszarze przyszczelinowym

nowych ElhandCutCore™ (Rys. 6). W rdzeniach tych poprzez odpowiednie rozmieszczenie i precyzyjne wyznaczenie poszczególnych szerokości szczelin niemagnetycznych uzyskuje się równomierny rozkład indukcji i ograniczenie niewygodnych strat mocy P_{FF} do minimum.



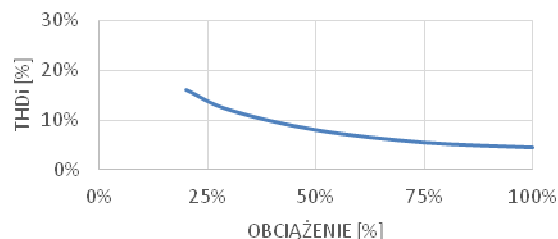
Rys. 6. Rdzeń wieloszczelinowy w technologii ElhandCutCore™

7. Badanie skuteczności tłumienia filtrów harmonicznych

Autorzy referatu od wielu lat prowadzą prace rozwojowe i optymalizacyjne w zakresie elementów indukcyjnych. Efektem tych prac jest między innymi rodzina filtrów harmonicznych o wysokiej sprawności na bazie rdzeni wieloszczelinowych. Jedną z ważniejszych kwestii przy doborze i projektowaniu elementów indukcyjnych współpracujących z przekształtnikami jest prawidłowe określenie kształtu prądu wejściowego, ponieważ jak wykazano ma on istotne

znaczenie dla ciepłych warunków pracy oraz sprawności elementu magnetycznego. Dlatego przedmiotem badań było wyznaczenie poziomu emisji harmonicznych układu przekształtnikowego z wejściem 6-pulsowym (160kW, 400V, 50Hz) dla różnych efektywnych impedancji obwodu wejściowego:

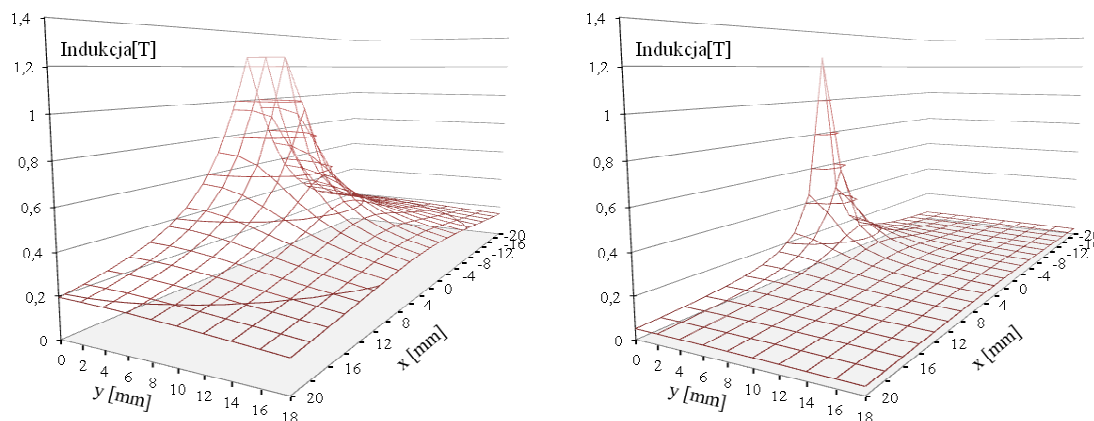
- bez dławika sieciowego (efektywna impedancja sieci w punkcie przyłączenia dla badanego przekształtnika wynosiła ok. 1%),
- z dławikiem sieciowym o impedancji 4% (wypadkowa impedancja z uwzględnieniem impedancji sieci wynosiła 5%),
- z filtrem harmonicznym typu ElhandHF. Badania i analiza zawartości harmonicznych w przebiegu prądu wejściowego przekształtnika dla każdego z wyżej wymienionych przypadków (Rys. 8) wykazała, że otrzymane wyniki pomiarów pokrywają się z wartościami harmonicznych wyznaczonymi w drodze symulacji komputerowej (Tab. 2)



Rys. 7. THDi prądu wejściowego dla filtru 160kW w funkcji obciążenia

8. Podsumowanie

Negatywne skutki i koszty występowania wyższych harmonicznych w prądzie wejściowym przekształtników to niewątpliwie problem użytkowników przekształtnikowych układów napę-



Rys. 5. Gęstość strumienia rozproszenia w obszarze przy szczelinowym dla różnej szerokości szczeliny niemagnetycznej: a) szczelina 10[mm], b) szczelina 2,5[mm]

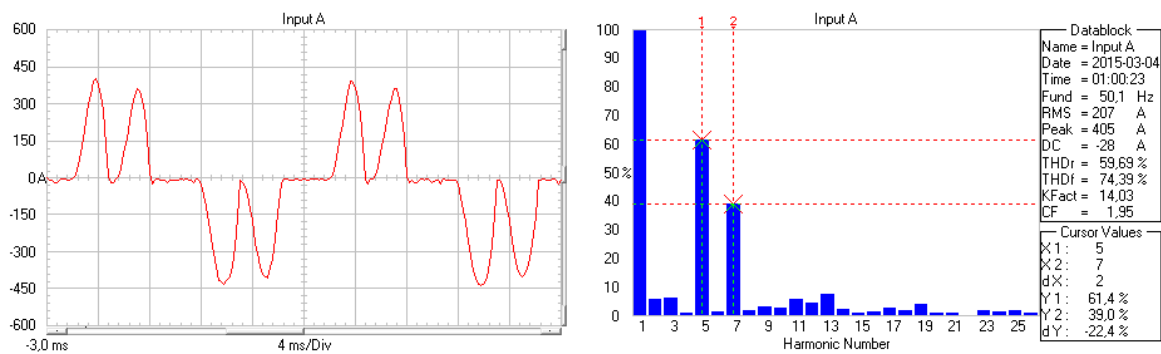
dowych. Konieczność przewymiarowania elementów magnetycznych współpracujących z przekształtnikiem, dodatkowe straty mocy, zakłócenia oraz rosnące wymagania odnośnie emisji harmonicznyc w punkcie przyłączenia, zmuszają do poszukiwania rozwiązań, które nie tylko wyeliminują skutki występowania harmonicznyc, ale też skutecznie je ograniczą w punkcie powstawania. Decyzję o wyborze odpowiedniego rozwiązania powinna poprzedzić dokładna analiza całego układu napędowego zarówno pod względem kompatybilności elektromagnetycznej, jak i sprawności wszystkich urządzeń. Kierowanie się tylko kryteriami ceny zakupu bardzo często prowadzi do generowania dodatkowych strat mocy czynnej, a pozorne oszczędności przyjdzie nam z pewnością oddać zakładowi energetycznemu w postaci opłaty za energię czynną. Dlatego racjonalne gospodarowanie energią elektryczną to coraz częściej wybór urządzeń o najwyższej sprawności, bo nic tak nie przekonuje użytkownika, jak całkowite i rzeczywiste koszty, które poniesie użytkując przekształtnikowy układ napędowy.

9. Literatura

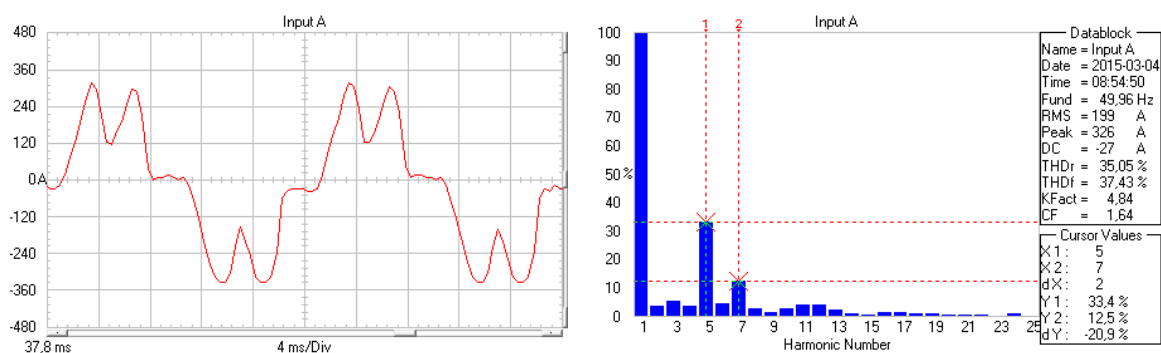
- [1]. J. Przybylski, Z. Szulc: „Wpływ struktury obwodu wejściowego przemiennika częstotliwości na efektywność energetyczną układu napędowego” *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 73/2005.
- [2]. A. Pozowski: „Nowe trendy ochrony sieci zasilających przed wyższymi harmonicznymi prądu i napięcia przy zasilaniu z przemienników częstotliwości” *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 79/2008.
- [3]. P. Wolnik, J. Sobota: „Wpływ występowania wyższych harmonicznyc w prądzie obciążenia transformatora dystrybucyjnego na sposób jego eksploatacji” *Konferencja – „Zarządzanie eksploatacją transformatorów”* Wisła – Jawornik 2012r.
- [4]. J. Rak, M. Gała, K. Jagieła, M. Kępiński; „Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych” *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 89/2011.
- [5]. A Van den Bossche, V. Cekov Valchev: „Improved calculation of Winding losses in gapped inductors” *Journal Of Applied Physics* 97.
- [6]. PN-EN 61378-1:2000 „Transformatory przekształtnikowe. Transformatory do zastosowań przemysłowych”.
- [7]. M. Łukiewski, J. Czornik; „Dławiki Wieloszczelinowe w Technologii ElhandCutCore”.
- [8]. Materiały i opracowania własne – Elhand Transformatory Sp. z o.o. Lubliniec.

Autorzy

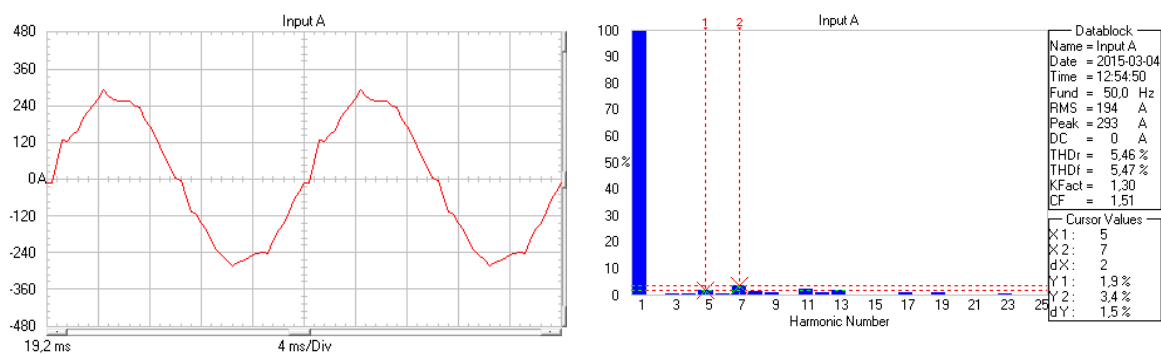
mgr inż. Jarosław Czornik
tel. +48 34 3473132
j.czornik@elhand.pl
mgr inż. Mirosław Łukiewski
tel. +48 34 3473131
m.lukiewski@elhand.pl
Elhand Transformatory Sp. z o.o.
ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec



Rys. 8a. Oscylogramy prądu wejściowego przekształtnika przy 1% efektywnej impedancji



Rys. 8b. Oscylogramy prądu wejściowego przekształtnika przy 5% efektywnej impedancji



Rys. 8c. Oscylogramy prądu wejściowego przekształtnika z filtrem harmonicznym