

# KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA W APLIKACJACH Z PRZETWORNICAMI CZĘSTOTLIWOŚCI - WYBRANE ZAGADNIENIA OGRANICZANIA ZAKŁÓCEŃ W OBWODACH ZASILANIA

Andrzej Gizicki

## 1. WSTĘP

Kompatybilność elektromagnetyczna jest to zdolność urządzeń, instalacji lub systemów do poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym bez wprowadzania dodatkowych zaburzeń elektromagnetycznych do tego środowiska lub do innych urządzeń, których poprawna praca mogłaby być z tego powodu zakłócona. Przez środowisko elektromagnetyczne rozumie się miejsce użytkowania urządzenia określone poziomem i charakterem zaburzeń (nazywanych zakłóceniami) pochodzących od ich źródeł.

Należy zwrócić uwagę, że źródłami mogą być obiekty emitujące fale elektromagnetyczne celowo (np. stacje telewizyjne i radiowe) jak i niezamierzenie (np. suszarka do włosów). W ramach kompatybilności elektromagnetycznej rozróżnia się pojęcia emisji zaburzeń i odporności na zaburzenia. Każde pracujące urządzenie elektryczne jest źródłem zaburzeń elektromagnetycznych o różnych poziomach i charakterze, rozprzestrzenianych drogą przewodową lub poprzez emisję promieniowania pól zaburzeń czyli propagację fal elektromagnetycznych. Zagadnienie odporności urządzenia na emisję zaburzeń pochodzących od jego podzespołów lub urządzeń zewnętrznych dotyczy głównie zagadnień istotnych w fazie jego projektowania, czyli tzw. kompatybilności wewnętrznej. Przy założeniu, że urządzenie spełnia normy produkcyjne dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej, istotne jest skupienie się na wykonaniu prawidłowej instalacji zasilania i eksploatacji urządzenia w określonych warunkach środowiskowych, aby nie powodować zakłócania pracy innych urządzeń znajdujących się w jego otoczeniu. Szczególnie w instalacjach z urządzeniami energoelektronicznymi, ze względu na ich nieliniowość, należy dążyć do maksymalnego ograniczania, zaburzeń rozprzestrzenianych drogą przewodową.

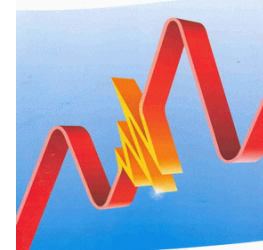
Badanie kompatybilności nie jest rzeczą nową w Polsce. Jednak z uwagi na koszt aparatury oraz stosunkowo długi czas trwania i skomplikowany charakter czynności badawczych nie jest ono rozpowszechnione. Polska jako kraj ze stosunkowo krótką historią obecności w Unii Europejskiej jest zmuszony do zmiany tego stanu rzeczy. Od 1 stycznia 1996 roku w krajach członkowskich obowiązuje dyrektywa Unii Europejskiej dotycząca kompatybilności elektromagnetycznej (EMC Directive 89/336/EEC). W jej wyniku powstały kryteria (tzw. normy zharmonizowane) jakie w zakresie emisji i odporności na zaburzenia muszą być spełnione przez wprowadzane na rynek urządzenia elektryczne i elektroniczne.

W Polsce normy określające dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń elektromagnetycznych i odporności na zaburzenia są od 15 września 2002 roku takie same jak w państwach UE.

PN-EN 55011:2001 Przemysłowe, medyczne i naukowe (PMN) urządzenia o częstotliwości radiowej - Charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych - Dopuszczalne poziomy i metody pomiarów. (33.100.10 Emisja EMC)

PN-EN61000-6-1:2002 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia - Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione.

PN-EN61000-6-2:2002 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia - Środowisko przemysłowe.



Jeśli jesteś zainteresowany pogłębieniem wiedzy lub rozwiązaniem problemu EMC w aplikacjach z przetwornicami częstotliwości odwiedź

[www.anap.pl](http://www.anap.pl)

PN-EN61000-6-3:2002 Kompatybilność elektromagnetyczna Wymagania ogólne dotyczące emisyjności - Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione.

PN-EN61000-6-4:2002 Kompatybilność elektromagnetyczna Wymagania ogólne dotyczące emisyjności - Środowisko przemysłowe.

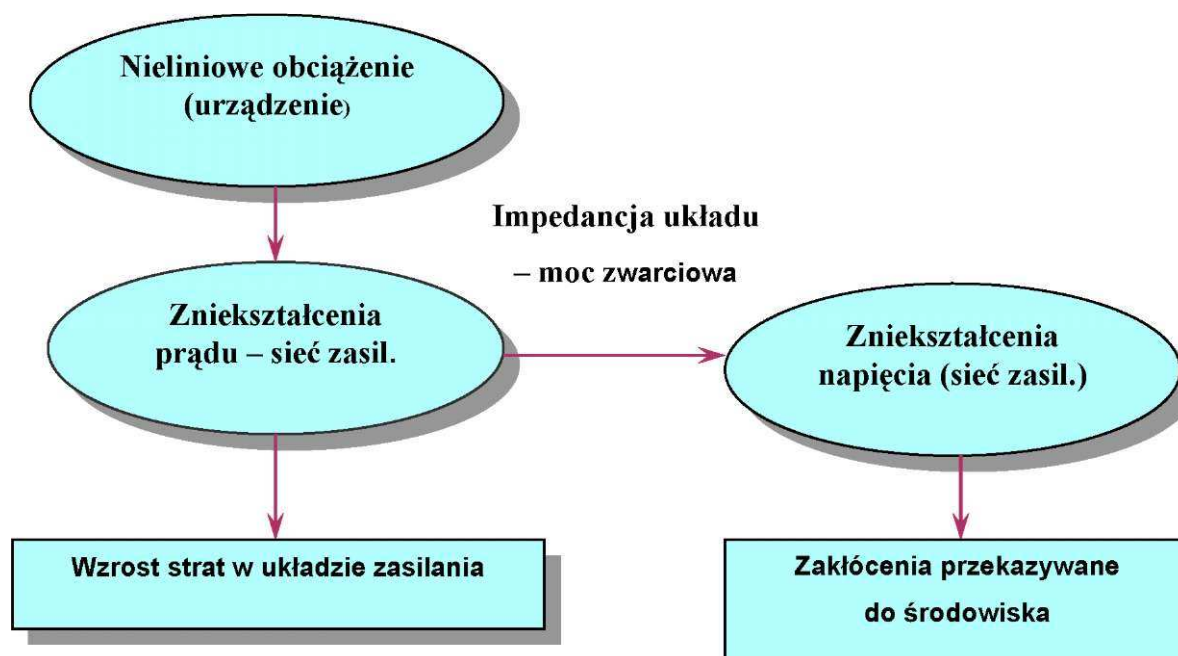
## 2. PODSTAWOWE DEFINICJE I PODSTAWOWE METODY OGRANICZANIA ZABURZEŃ PRZEWODOWYCH WPROWADZANYCH DO SIECI ZASILANIA PRZEZ PRZETWORNICE CZĘSTOTLIWOSCI

Przetwornice częstotliwości ze względu na coraz powszechniejsze i ich rosnącą ilość w aplikacjach przemysłowych mogą być potencjalnie źródłem zaburzeń przewodowych, ponieważ pobierany przez nie z sieci zasilania prąd nie jest sinusoidalny i jego wyższe harmoniczne przenoszą dużą część mocy pobieranej z sieci zasilania. Wyższe harmoniczne niskich rzędów są przyczyną dużych strat i zaburzeń w poprawnej pracy sieci energetycznej. Wiele prac technicznych ma na celu jedynie minimalizowanie tych negatywnych skutków.

Podstawowe własności zaburzeń, harmonicznego prądu niskiej częstotliwości w sieci zasilania:

- zakres częstotliwości:  $0 < f < 1$  do 5 MHz
- występowanie - głównie w formie przewodzonej
- czas trwania - najczęściej zakłócenia długie (np. 100ms). Przy generowaniu harmonicznego zakłócenie występuje bez przerwy
- energia - przewodzona energia może być bardzo duża prowadząca do nieprawidłowego działania urządzenia, a nawet do zniszczenia

Na rys.1 przedstawiono wpływ nieliniowego odbiornika energii na występowanie zaburzeń napięcia w sieci zasilania.



Rys. 1. Odbiornik nieliniowy jako źródło zniekształceń harmonicznego prądu powoduje zniekształcenia napięcia w sieci zasilania.

Zniekształcenia prądowe związane są z urządzeniami, natomiast zniekształcenia napięciowe związane są z układem pracy (środowiskiem) danego urządzenia. Dla określenia poziomu zniekształceń napięciowych konieczna jest wiedza o poziomie zniekształceń prądowych i zwarciowej impedancji układu. Nie jest możliwe określenie zniekształceń napięciowych jedynie na podstawie znajomości parametrów napędu. Zniekształcenia napięciowe charakteryzują parametry układu zasilania. Zniekształcenia prądowe charakteryzują indywidualne cechy urządzenia.

Dla przedstawienia dopuszczalnych poziomów zawartości harmonicznych w przebiegach napięć lub prądów wprowadzono pojęcie współczynnika *THD* (*Total Harmonic Distortion*), tj. całkowitej zawartości harmonicznych. Jest on odpowiednio definiowany dla zawartości harmonicznych napięcia i prądu:

$$THDu = \sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2}, \quad THDi = \sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2}, \quad (1)$$

gdzie:  $[U_k]$  (lub  $[I_k]$ ) jest kolejną harmoniczną przebiegu podstawowego  $U_1$  (lub  $I_1$ ), a  $N$  - liczbą uwzględnianych harmonicznych.

Współczynnik TDD (ang. Total Demand Distortion) wyraża procentowy udział zniekształceń w maksymalnym prądzie obciążenia - zwykle odnoszony do 15 lub 30 min. zapotrzebowania mocy. TDD jest wielkością wiążącą własności układu zasilania z wartością prądu obciążenia  $I_L$ . Wartość prądu obciążenia  $I_L$  ma decydujący wpływ na wartość współczynnika TDD. W standardzie wg American Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE- 519-1992, na którym będą opierać się przyszłe normy techniczne do budowy urządzeń energoelektronicznych, przedstawiono dopuszczalne poziomy odkształceń prądu pobieranego przez odbiorniki. Wymagania te dotyczą wartości kolejnych harmonicznych do rzędu 11. Ponadto dopuszczalna wartość współczynnika harmonicznych prądu *THDi* jest uzależniona od wielkości mocy zwarciowej układu zasilania.

$$TDD = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{n=2}^{N_{\max}} I_{(n)}^2} \cdot 100 \% \quad (2)$$

**Tabela 1.** Dopuszczalne poziomy zawartości harmonicznych nieparzystych prądu dla nieliniowych obciążeń w sieciach TN współpracujących z innymi obciążeniami i napięciach 120Y-69.000Y wg standardu IEEE-519

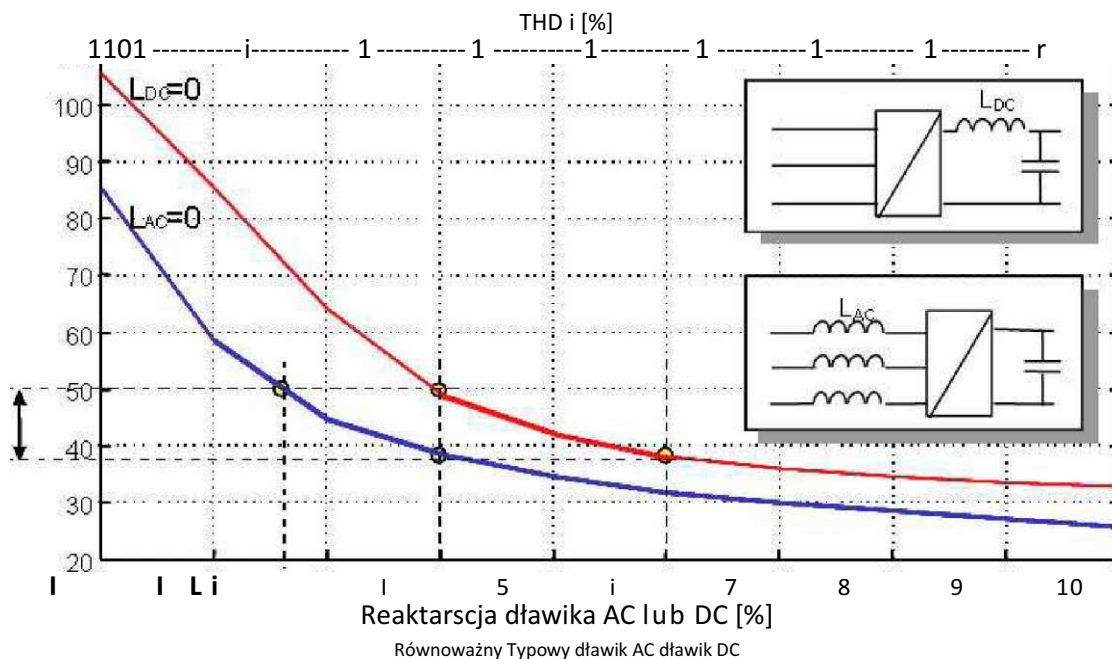
$I_{zw}/I_{obc}$	<20	20...50	50...100	100...1000	>1000
THDi dla n<11	4%	7%	10%	12%	15%
TDDi	5%	8%	12%	15%	20%

Standard ten określa też wrażliwość urządzeń elektrycznych stosowanych publicznie na zakłócenia harmoniczne oraz dopuszczalny poziom zniekształceń harmonicznych napięcia w sieci. IEEE 519 zawiera różne limity dla różnych typów budynków. Problem ten pokazano w tabeli 2. Jak widzimy sieci przemysłowe mają dużo mniej surowe przepisy niż np. budynki mieszkalne. Dlatego napędy z przetwornicami częstotliwości nie zawsze muszą posiadać filtry harmonicznych prądu.

**Tabela 2.** IEEE 519 - ogólne standardy dla zakłóceń harmonicznych napięcia.

Klasa zastosowania	THDu (%)
Zastosowanie wrażliwe: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lotniska, Szpitale</li> <li>• Telekomunikacja</li> </ul>	3%
Zastosowanie ogólne: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biura, Szkoły</li> </ul>	5%
Zastosowanie lokalne <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabryki</li> </ul>	10%

Jakkolwiek w rzeczywistych układach odbiorników nieliniowych stawiane wymagania na THDi nie da się spełnić bez stosowania filtrów aktywnych lub innych kosztownych układów kompensacji mocy odkształconej, co powoduje znaczne koszty budowy instalacji zasilania stają się bardzo duże. Są to dławiki AC stosowane przed prostownikiem lub dławiki umieszczone w obwodzie DC, które wraz z pojemnością obwodu pośredniego przetwornic pełnią rolę filtra dolnoprzepustowego ograniczając w sposób zauważalny poziom wyższych harmonicznych i ich udział w odkształceniu prądu zasilania. Podstawową metodą ograniczenia wpływu obwodu wejściowego na kształt prądu, a tym samym poziom THDu w obwodzie zasilania przetwornic jest stosowanie elementów indukcyjnych w ich obwodach wejściowych. Na rys. 2 pokazano wpływ wartości indukcyjności dławików AC i DC na wartość THDi i zaznaczono typowe zakresy stosowanych rozwiązań technicznych.

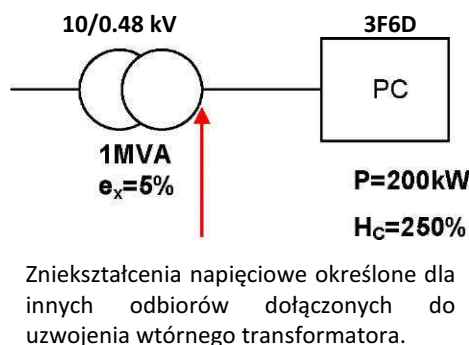


Rys. 2. Współczynnik zawartości harmonicznych THDi prądu wejściowego prostownika trójfazowego 3F6D w zależności od wartości indukcyjności dławika AC i DC.

Z rys. 2 wynika, że **nie ma możliwości obniżenia zawartości THDi w sieci zasilania poniżej ok. 38%** przy powszechnie stosowanych dzisiaj prostownikach 3F6D jako stopniach wejściowych napięciowych przetwornic częstotliwości. Obecnie napięciowe przetwornice częstotliwości z prostownikiem 3F6D przekraczają moce 500kW przy zasilaniu z sieci o napięciu 3x380-690V. Uwzględniając THDi przetwornic częstotliwości na poziomie 40%, co zapewniają praktycznie wszyscy

renomowani producenci poprzez dołączanie dławików AC lub DC o właściwej indukcyjności, należy dążyć do ograniczenia obciążenia transformatora zasilającego mocą odkształconą tak by nie powodować zniekształcenia napięcia powyżej wartości określonej normami - patrz tabela 2.

Poniżej podano przykład wyznaczenia zniekształceń napięciowych w obwodzie wtórnym transformatora SN o mocy pozornej 1MVA, przekładni 10/0.48kV, i współczynnika mocy zwarciowej  $e_x=5\%$ , z którego zasilany jest 200kW przetwornica częstotliwości z 6- pulsowym diodowym

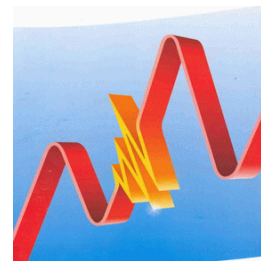


Rys. 3 . Schemat układu zasilania przetwornicy częstotliwości

Bez przeprowadzania dokładnych obliczeń można przyjąć, że dla przetwornic częstotliwości z napięciowym obwodem pośrednim o wartości THDi bliskiej 40%, uzyskujemy THDu w pobliżu transformatora bliskie 5%, jeśli maksymalna moc czynna przetwornicy do mocy pozornej transformatora wynosi mniej niż 40%. Można dla potrzeb inżynierskich w typowych warunkach zasilania ( $e_x=5\%$ ) ekstrapolować liniowo moc pozorną transformatora dla wyznaczenia wartości THDu równej 2.5% i 10%.

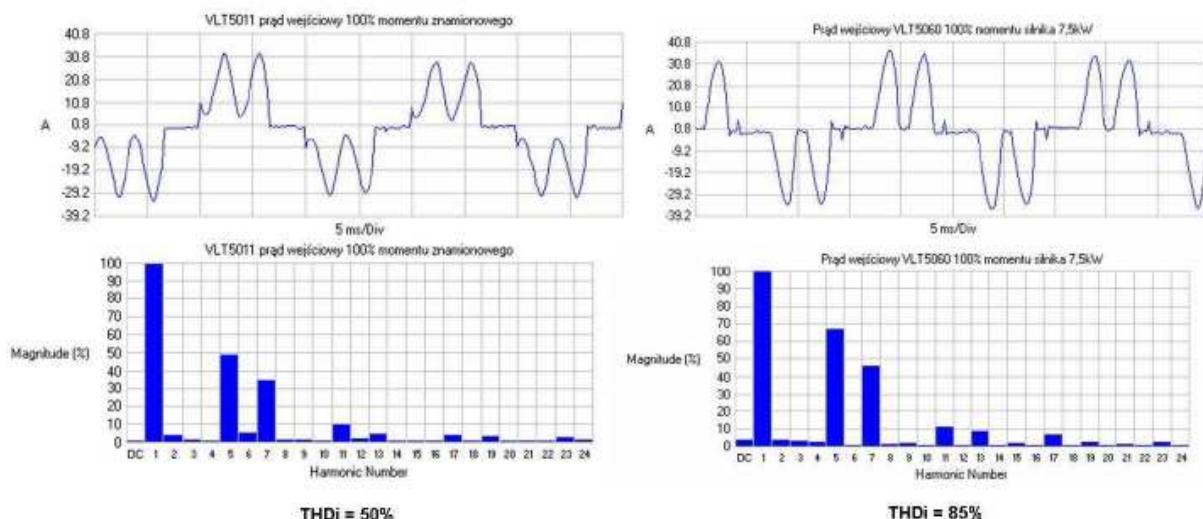
Powyższy przykład nie uwzględnia impedancji wnoszonej przez linię zasilania przetwornicy częstotliwości. Natomiast impedancja wnoszona przez linię zasilającą jest czynnikiem obniżającym wartość THDu i wpływającym na poprawę parametrów zasilania innych odbiorników zasilanym z tego samego transformatora nn.

Należy również pamiętać o tym, że istotny wpływ na wartość THDi ma aktualne lub przewidywane obciążenie przetwornic częstotliwości z pojemnościowym stopniem pośrednim. W zależności od chwilowego obciążenia silnika zasilanego z przetwornicy częstotliwości zmienia się charakter i kształt prądu w obwodzie zasilania. Na rys. 4 pokazano wynik porównania charakteru prądu i wartości THDi dla dwóch modeli przetwornic częstotliwości - VLT5011 o mocy znamionowej 7,5 kW i VLT5060 o mocy znamionowej 45 kW. Obydwie te jednostki były użyte do zasilania silnika 7,5 kW obciążonego znamionowo. Tak więc jednostka VLT5011 pracowała z nominalnym obciążeniem, zaś VLT5060 z obciążeniem ok. 16% obciążenia znamionowego.



Jeśli jesteś zainteresowany pogłębieniem wiedzy lub rozwiązaniem problemu EMC w aplikacjach z przetwornicami częstotliwości odwiedź

[www.anap.pl](http://www.anap.pl)



Rys.4 Wpływ obciążenia przetwornicy częstotliwości na poziom zniekształceń prądu w obwodzie zasilania.

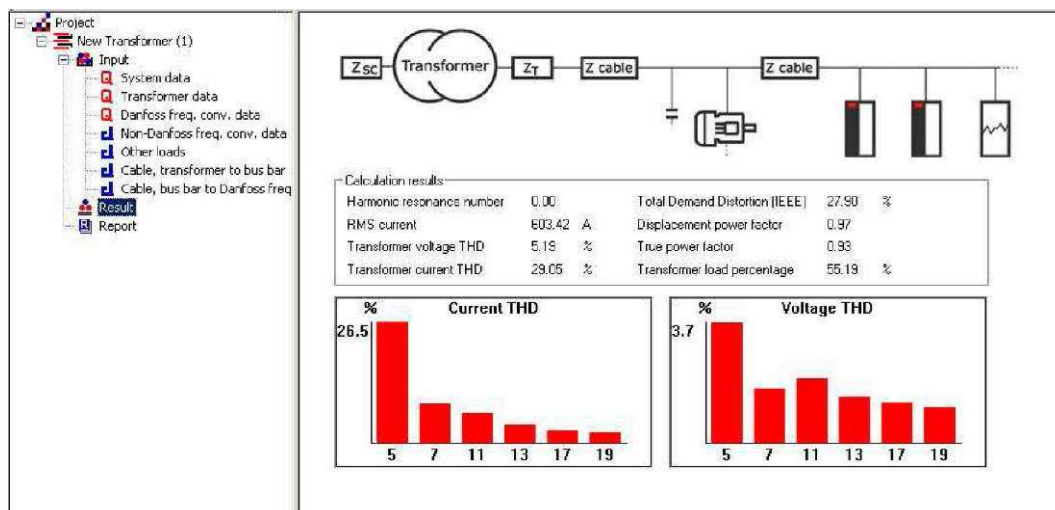
Dla potrzeb pewnej automatyzacji i uproszczenia zagadnień obliczeniowych mających na celu wyznaczenie wartości zniekształceń w obwodach, w których przetwornice częstotliwości stanowią istotną część odbiorników. Firma Danfoss udostępnia nieodpłatnie program do obliczeń inżynierskich - MCT31, który pozwala na symulację skutków oddziaływania przetwornic częstotliwości na system zasilania.

Program wymaga wprowadzenia następujących danych:

- > mocy zwarciowej systemu
- > danych transformatora - mocy nominalnej, napięcia nominalnego, napięcia zwarcia
- > wielkości zainstalowanych przetwornic Danfoss i przetwornic innych producentów w kW i ich stopnia obciążenie odniesionego do obciążenia znamionowego
- > długości i przekrojów przewodów zasilających przetwornice
- > informacji o innych odbiornikach istniejących w sieci zasilającej - silnikach, kompensatorach mocy biernej, itp.
- > zastosowanych dodatkowych metod ograniczenia THDi - np. dodatkowe dławiki, filtry pasywne itd.

Jako wynik otrzymujemy spodziewane wartości prądów, THDi, THDu,  $\cos\phi$ , wsp. mocy na podstawie, których możemy podjąć różne decyzję np. o konieczności stosowania filtrów harmonicznych. Na rys. 5 pokazano widok podstawowego raportu programu MCT31. Ponadto program pozwala na tworzenie innych bardziej szczegółowych raportów dotyczących symulacji układu.

Należy jednak pamiętać o tym, że MCT31 jest jedynie narzędziem symulacyjnym i w wyniku obliczeń programu nie są ostateczną wykładnią opisującą układ, a jedynie szacunkiem (przybliżeniem) pozwalającym na wyznaczenie kierunków postępowania. W każdym przypadku rzeczywisty układ powinien być zweryfikowany przez przeprowadzenie odpowiednich pomiarów.



Rys. 5. Widok ekranu raportu programu MCT31.

### 3. FILTRY PASYWNE AHF-005 I AHF-010 FIRMY DANFOSS - SKUTECZNA METODA OGRANICZENIA WPŁYWU PRZETWORNIC CZĘSTOTLIWOŚCI NA PARAMETRY SIECI ZASILAJĄCEJ

Danfoss oferuje różne techniki redukcji harmonicznych. Standardowo wszystkie przetwornice częstotliwości Danfoss wyposażone są w wbudowane dławiki DC redukujące harmoniczne w obwodzie wejściowym o połowę w stosunku do przetwornic bez indukcyjności. Wbudowane dławiki DC nie tylko zapewniają zgodność ograniczenia harmonicznych z dopuszczalnymi poziomami w większości aplikacji, ale także zapewniają wydłużoną żywotność kondensatorów obwodu DC przetwornic.

Danfoss opcjonalnie oferuje także filtry harmonicznych AHF010 i AHF005, gdzie AHF010 redukuje harmoniczne prądu THDi do wartości nie przekraczającej 10%, a AHF005 redukuje harmoniczne prądu THDi do wartości nie przekraczającej 5%.

Filtry AHF005 i AHF010 są bardziej zaawansowanymi filtrami harmonicznych w porównaniu do tradycyjnych filtrów drabinkowych LC. Zostały zaprojektowane w szczególności do współpracy z przetwornicami firmy Danfoss.

#### Podstawowe parametry

Napięcie zasilania: 360 - 500 Vac-50/60Hz; wkrótce 3 x600-690 Vac 50/60 Hz

Prąd znamionowy filtra: 10-325A

(dla wyższych mocy moduły mogą być połączone równolegle)

#### Charakterystyka filtrów AHF010 i AHF005.

- małe kompaktowe obudowy wyposażone w panel podłączeniowy,
- łatwe do zastosowania w starszych aplikacjach z przetwornicami,
- AHF010 redukuje wartość współczynnika harmonicznych THDi do 10 %,
- AHF005 redukuje wartość współczynnika harmonicznych THDi do 5 %,
- jeden moduł filtra może być używany do kilku przetwornic częstotliwości,
- wysoka sprawność, powyżej 98%
- nie ma konieczności regulacji,
- nie wymaga okresowego serwisu.

W porównaniu do innych znanych rozwiązań filtry harmonicznych AHF 005/010 firmy Danfoss zapewniają bardzo dobre parametry dla obwodów zasilania przetwornic częstotliwości. Poniżej w tabeli zestawienie porównawcze.

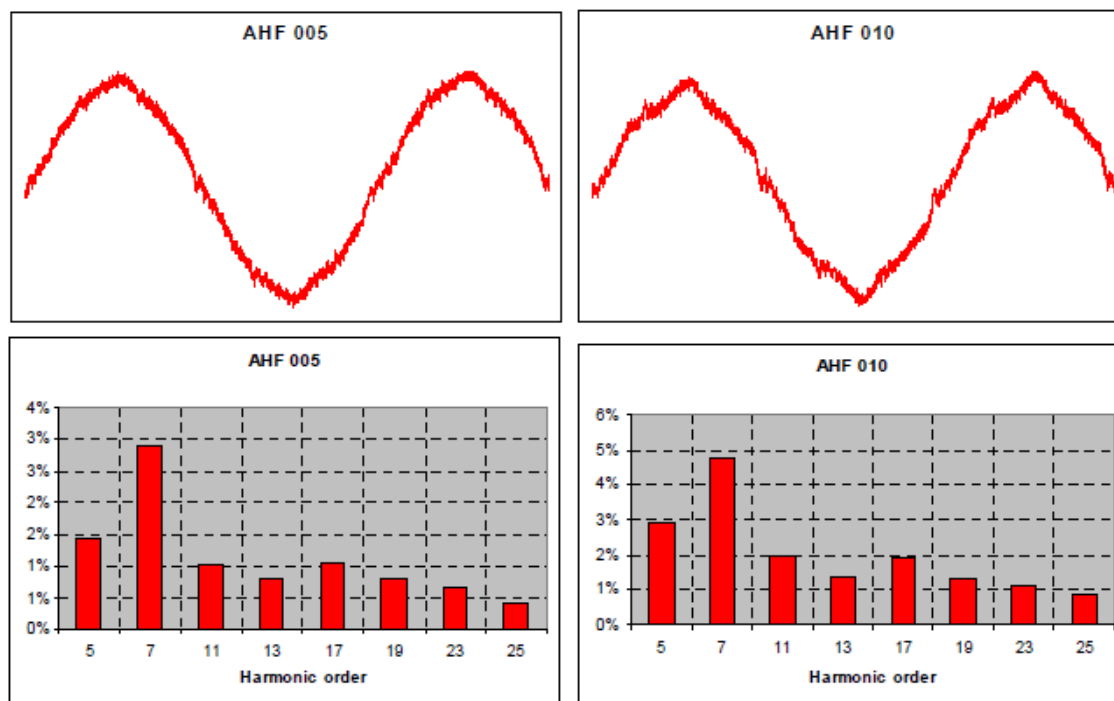
**Tabela 3.** Porównanie różnych metod ograniczenia wartości THDi w obwodach zasilania przetwornic częstotliwości

Zastosowana metoda	THDi
Podstawowy 3 fazowy prostownik 6-pulsowy	60% - 80%
Prostownik 3 fazowy z wejściowymi dławikami AC	35% - 45%
Przetwornica częstotliwości VLT f-my Danfoss z wbudowanymi dławikami w obwodzie DC	< 40%
Prostownik 12-pulsowy	10% - 15%
Przetwornica częstotliwości VLT f-my Danfoss z AHF010	< 10%
Prostownik 18-pulsowy	4% - 7%
Filtry aktywne	3% - 8%
Przetwornica częstotliwości VLT f-my Danfoss z filtrem AHF 005	< 5%

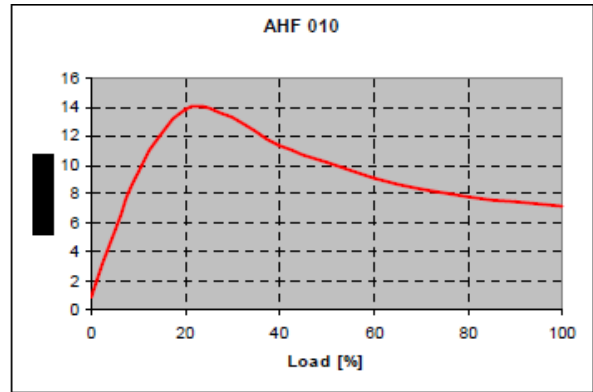
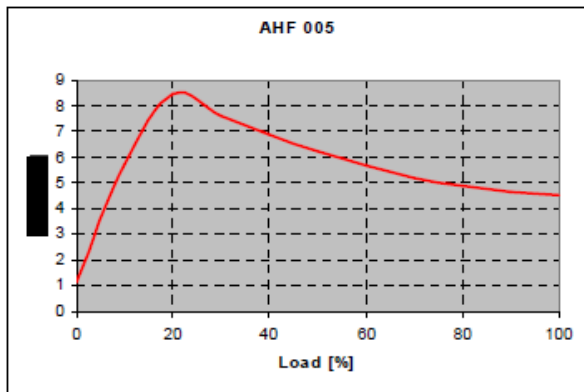
**Osiągi filtrów AHF 010 i AHF 005 przy nieidealnym napięciu zasilającym.**

Wiadomo, że idealne 3-fazowe napięcie zasilające praktycznie nie istnieje. Filtry harmoniczne Danfoss AHF005 i AHF010 są tak efektywne, że zapewniają wartość THDi do 10% i 5%, także jeśli wcześniej w sieci współczynnik zawartości harmonicznego napięcia wynosił do 2% lub asymetria napięcia wyniosła do 2%. Co więcej jak widać na niżej pokazanych wykresach nawet znaczna wstępna 3% asymetria napięcia lub znaczna wartość współczynnika harmonicznego napięcia wynosząca do 5% nie uniemożliwia osiągnięcia znacznej redukcji harmonicznego prądu.

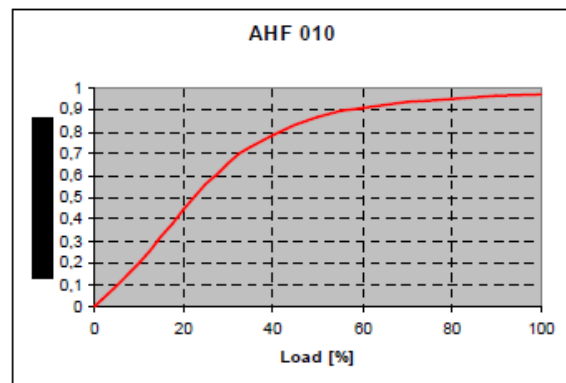
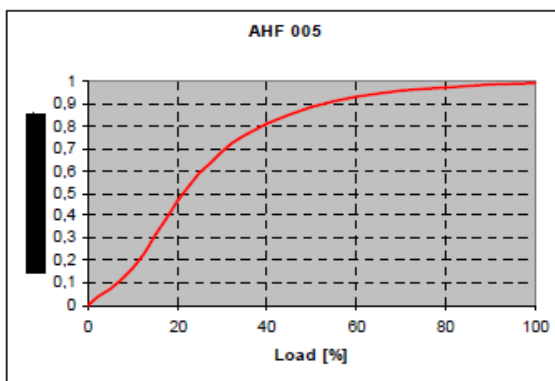
Należy pamiętać, że wszystkie inne filtry harmoniczne oraz prostowniki 12 i 18 pulsowe są podatne na nieidealne napięcie zasilające takie jak asymetria napięcia lub napięcie zniekształcone. Nieidealne parametry napięcia zasilania nie są i nie powinny być brane pod uwagę jako czynnik ograniczający zastosowania rozwiązań wykorzystujących filtry AHF010 i AHF005.



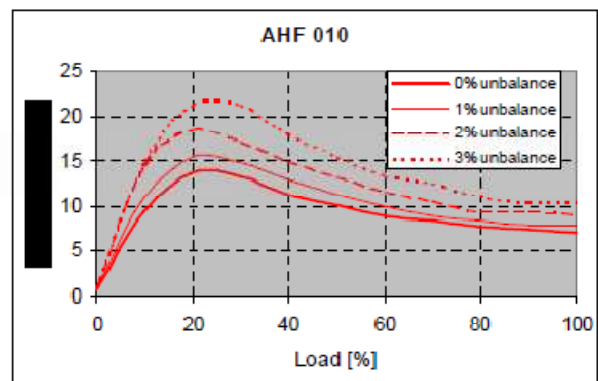
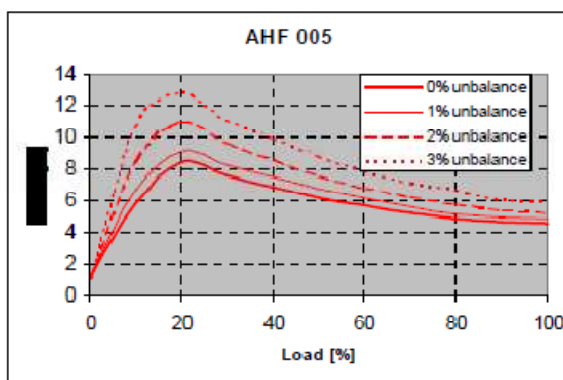
Rys. 6 Kształt prądu i widmo dla filtrów AHF005/010 dla nominalnego obciążenia



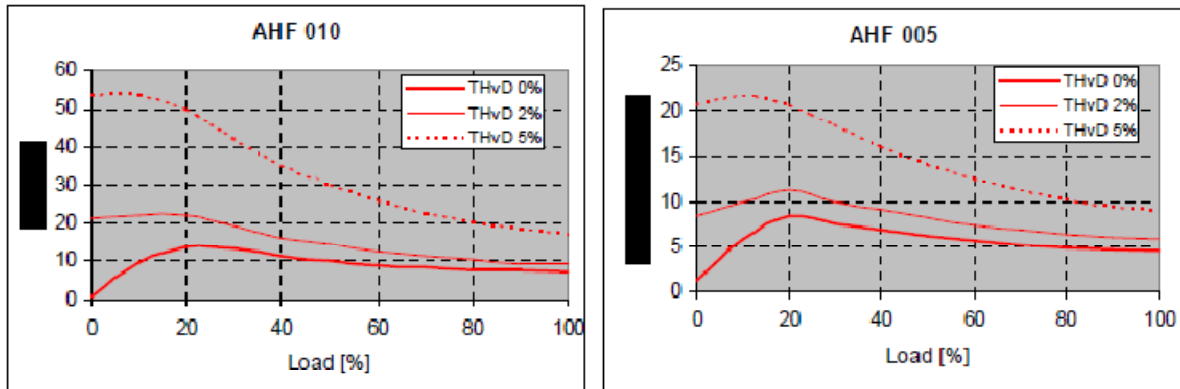
Rys. 7. Współczynnik zawartości harmonicznych THDi w funkcji obciążenia



Rys. 8. Całkowity współczynnik mocy TPF w funkcji obciążenia



Rys. 9 Współczynnik zawartości harmonicznych THDi w funkcji asymetrii napięcia zasilania

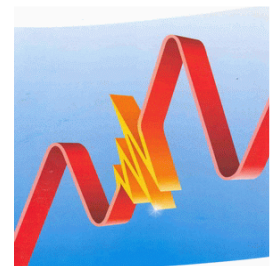


Rys. 10. Współczynnik zawartości harmonicznych THDi w funkcji wstępnego zniekształcenia napięcia zasilania THDu

#### 4. LITERATURA

1. Hansen S., New Topologies for Connecting Power Electronic Converters to the Utility Grid. Danfoss Professor Programme in Power Electronics and Drives 1997-2000
2. Szymański J.: Napędy przemysłowe z przekształtnikami napięciowymi o zmniejszonym negatywnym oddziaływaniu na środowisko i ulepszonej współpracy z silnikami prądu przemiennego. PR Radom, PNB Nr1949/01/P. 2003
3. Przybylski J., Szulc Z.: Określenie zawartości harmonicznych w napięciu i prądzie zasilającym zakłady przemysłowe. Napędy Przemysłowe NP'99
4. Hansen S. i inni: Line Side Harmonic Reduction Techniques of PWM Adjustable Speed Drives, Danfoss Drives A/S - 2002
5. Normy techniczne dotyczące EMC - PN-EN 55011:2001, PN-EN61000:2002,
6. Dokumentacja techniczno-ruchowa filtrów AHF010 i AHF005 - MG.80.B2.02, Danfoss Driver A/S: 2002
7. Instrukcja użytkownika programu MCT31 - Danfoss Driver A/S: 2003

Red. 2005



Jeśli jesteś zainteresowany pogłębieniem wiedzy lub rozwiązaniem problemu EMC w aplikacjach z przetwornicami częstotliwości odwiedź

[www.anap.pl](http://www.anap.pl)