

WOJCIECH CZUCHRA, WALDEMAR ZAJĄC\*

## ZABURZENIA ELEKTROMAGNETYCZNE PRZEWODZONE W LABORATORYJNYCH NAPĘDACH PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH

### ELECTROMAGNETIC CONDUCTED INTERFERENCES IN LABORATORY CONVERTER DRIVES

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych przeprowadzonych w dwóch rodzajach napędów przekształtnikowych. Pierwszym układem była pięciofazowa przetwornica typu step-down zasilająca silnik szeregowy prądu stałego, natomiast drugi układ był napędem falownikowym z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Podczas badań zastosowano trójfazową sieć sztuczną typu NSLK 8126 i analizator widma Advantest R3131A. Zamieszczono także wyniki widm elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych dla różnych konfiguracji pracy badanych układów, które pracowały z typowym filtrem sieciowym EMI lub bez filtra. Pomimo że poziom zaburzeń przewodzonych nie przekłada się bezpośrednio na emisję zaburzeń promieniowanych, to tego rodzaju test może być podstawą do wyznaczenia poziomu zaburzeń promieniowanych, a także doboru filtra.

*Słowa kluczowe: napędy przekształtnikowe, kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia elektromagnetyczne przewodzone*

#### Abstract

The article presents results of measurements of electromagnetic conducted interferences for two kinds of converter drives. The measurements were carried out with three phase artificial network type NSLK 8126 and spectrum analyzer type Advantest R3131A. Presented spectrum of electromagnetic conducted interferences are for different configurations of tested circuits, with and without typical EMI filter. Although the levels of conducted interference do not translate directly into the emitted field, the tests can be used as a basis for both the evaluation of interference and the selection of filters.

*Keywords: converter drives, electromagnetic compatibility, conducted electromagnetic interferences*

\* Dr inż. Wojciech Czuchra, dr inż. Waldemar Zajęc, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Wprowadzanie nowoczesnych rozwiązań systemów przekształtnikowych w nowych i modernizowanych pojazdach trakcyjnych wiąże się z koniecznością dostosowania tych układów do wymogów kompatybilności elektromagnetycznej. Jest to zagadnienie skomplikowane ze względu na fakt, że szybki rozwój systemów przekształtnikowych stał się jednocześnie powodem pojawienia się licznych problemów w zapewnieniu kompatybilności elektromagnetycznej. Analiza zjawisk występujących w nowoczesnych przekształtnikach, które stanowią przyczynę generowania zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych, może być wstępnie przeprowadzona na etapie prac laboratoryjnych. W tych warunkach istnieje możliwość łatwiejszego dokonania pewnych zabiegów mających na celu ograniczenie niepożądanego emisji elektromagnetycznej.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki pomiarów zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych na przykładzie dwóch rodzajów systemów przekształtnikowych. Pomiary przeprowadzono z zastosowaniem trójfazowej sieci sztucznej NSLK 8126 oraz analizatora widma Advantest R3131A. Przedstawiono także uzyskane wyniki widma zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych dla dwóch konfiguracji badanych układów, które pracowały z filtrem w.cz. (filtr EMI) lub bez filtra.

## 2. Wpływ topologii przekształtnika na poziom zakłóceń elektromagnetycznych

Emisja zakłóceń elektromagnetycznych jest związana z widmem amplitudowym impulsów prostokątnych występujących w przekształtnikach. O widmie tym decyduje nie tylko znana już częstotliwość przełączania tranzystorów IGBT w przekształtniku głównym i pomocniczym, ale również amplituda impulsów, czas narastania i opadania prądu, napięcia oraz oscylacje powstające w momencie przełączania na każdym elemencie przekształtnika, uczestniczącym w komutacji prądu i napięcia. Jest to wynikiem pasożytniczych pojemności i indukcyjności występujących w module tranzystora i układzie połączeń pętli prądowych. Ich całkowita eliminacja nie jest możliwa, ale należy wiedzieć, gdzie np. pojemność pasożytnicza trzeba świadomie powiększyć, a gdzie należy ją bezwzględnie eliminować.

Przekształtniki dużej mocy z konieczności muszą być budowane z elementów, których masa i objętość ma określone wartości. Do tych elementów, w zależności od topologii przekształtnika, należą: tranzystory IGBT, diody, filtry, elementy L, C, R oraz połączenia pomiędzy nimi w postaci: drutu, skrętki twisted wire pair, płaskownika czy płyty Cu. Wynika z tego szerokie spektrum możliwości dla konstruktora przekształtnika [1]. Optymalna konstrukcja mechaniczna przekształtnika powinna uwzględniać zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej od początku procesu konstrukcji [5].

Wybór konkretnego układu przekształtnika związany jest z jego późniejszym zastosowaniem: badania poznawcze, zastosowanie komercyjne (przemysłowe) lub inne. W przypadku zastosowań przemysłowych, w których warunkiem dopuszczenia do eksploatacji jest spełnienie określonych norm emc, należy dokonać wyboru takiej topologii przekształtnika, który najprostszymi drogami doprowadzi do celu. Sprowadza się to do wyboru przekształtnika, który zawiera minimalną liczbę elementów czynnych (IGBT, D) i biernych (L, C, inne). Komplikowanie topologii usprawiedliwione może być tylko w przypadku osiągnięcia

określonych celów, niemożliwych do uzyskania w inny sposób. Mała liczba elementów użytych do budowy ma również istotny wpływ na koszt całego przekształtnika. W zastosowaniach trakcyjnych można zauważyć tendencję do całkowitej eliminacji elementów indukcyjnych.

Od momentu pojawienia się na rynku tranzystorów typu IGBT na początku lat 80. XX w. nastąpił znaczący postęp w energoelektronice. Zalety tego typu tranzystorów (duża szybkość przełączania, małe straty w stanie przewodzenia i przełączania, proste obwody sterowania, prosta kontrola szybkości przełączania, brak konieczności stosowania obwodów komutacyjnych) spowodowały ich szerokie zastosowanie w budowie przekształtników. Daje to duże możliwości konstruktorowi przekształtnika pod warunkiem pełnej i świadomej kontroli wszystkich zjawisk zachodzących w przekształtniku. W przeciwnym razie zalety tranzystora IGBT w postaci dużych wartości  $di/dt$  i  $du/dt$  w połączeniu z pasożytniczymi L i C mogą spowodować wiele problemów, które później trudno wyeliminować [2].

Przy wyborze modułu IGBT należy brać pod uwagę jego własności dynamiczne i nowoczesność samej konstrukcji modułu. Pierwsze moduły IGBT miały konstrukcje przejęte od tranzystorów bipolarnych, które miały dużo mniejsze stromości  $di/dt$  i  $du/dt$ . Powodowało to duże problemy w przypadku zwiększonych stromości uzyskiwanych przez IGBT. Producenci jednak sukcesywnie udoskonalają swoje wyroby, proponując moduły typu low profile, disk-type design czy SkiiP technology [3]. Wszystkie te udoskonalenia prowadzą do eliminacji wewnętrznych pasożytniczych indukcyjności i pojemności tranzystorów IGBT, co ma później istotny wpływ na poziom emisji zakłóceń.

W przypadku doboru elementów L, C moduł powinien być również podporządkowany analizie obecności pasożytniczych pojemności (w przypadku dławików) i indukcyjności (w przypadku kondensatorów). Należy również brać pod uwagę niekorzystne zjawiska, jakie dają pole rozproszenia pochodzące od elementów indukcyjnych i stosować takie rozwiązania, które eliminują te zjawiska.

### 3. Dobór filtru w.cz.

O poziomie emisji zakłóceń urządzenia decydują wszystkie elementy systemu, przez które następuje „wyciek” pola elektromagnetycznego do otoczenia. Eliminację zakłóceń w dolnym paśmie częstotliwości: 0,15–30 MHz zapewnia prawidłowo zaprojektowany, wykonany i zainstalowany filtr dolnoprzepustowy. Stosowanie filtrów, które nie są predysponowane dla konkretnego przekształtnika, zwykle nie daje pożądanego rezultatu.

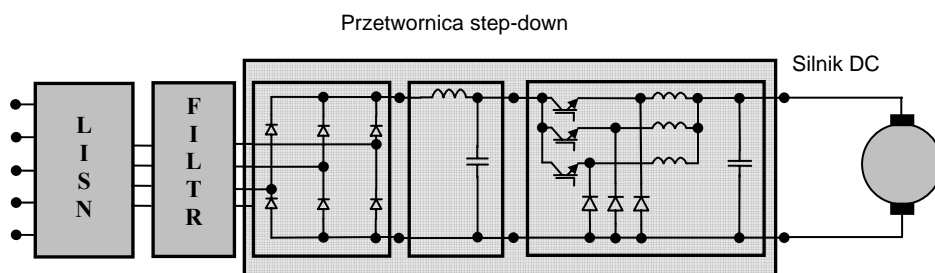
Charakterystyka „uniwersalnego filtru” zdejmowana przez producenta w jego laboratorium ma określoną tłumienność dla określonych warunków pomiaru (zwykle przy wyidealizowanych wartościach impedancji uziemienia, impedancji obciążenia, warunków ekranowania), co w układach rzeczywistych nie jest możliwe do spełnienia.

### 4. Obiekty badań

Laboratoryjny model wielofazowej przetwornicy jest zbudowany jako przekształtnik 300V/60V, który jest przeznaczony do zasilania silnika prądu stałego [7]. Podstawowe dane techniczne modelu laboratoryjnego są następujące:

- napięcie zasilania – DC 300V,
- pulsacja prądu wyjściowego – 20%,
- maksymalne napięcie wyjściowe DC 60 V,
- maksymalny stosunek  $V_{in}/V_{out} = 5$ ,
- maksymalny prąd wyjściowy – 100 A;
- częstotliwość pracy na fazę – od 1 do 5 kHz,
- maksymalna liczba faz – 5,
- silnik szeregowy prądu stałego jako obciążenie RLE (ET3.5/48/52,  $P = 3,5$  kW,  $U = 48$  V,  $I = 87$  A,  $nm = 5200$  r.p.m.; silnik jest używany do napędu wózków akumulatorowych).

Pięciofazowa przetwornica typu step-down zbudowana jest z zastosowaniem tranzystorów typu 2xIRGPC50S oraz diod 2xFES16JT (na fazę). Schemat systemu laboratoryjnego pokazano na ryc. 1. Obciążenie silnika szeregowego prądu stałego stanowi silnik asynchroniczny, pracujący jako hamulec. Zasilanie układu odbywa się przez trójfazowy autotransformator oraz trójfazowy prostownik mostkowy. Napięcie zasilania (300 V) jest doprowadzone do przekształtnika przez filtr wejściowy typu LC. Szeregowo indukcyjności w przetwornicy są wykonane z zastosowaniem rdzeni toroidalnych proszkowych, dzięki czemu mają tzw. szczelinę rozproszoną. System sterowania zrealizowany jest na podstawie obwodów analogowych i cyfrowych. Zapewnia on możliwość regulacji częstotliwości pracy i wybór liczby pracujących faz. Wielofazowy przekształtnik posiada sprzężenie zwrotne w odniesieniu do napięcia wejściowego, prądu wyjściowego oraz napięcia wyjściowego.



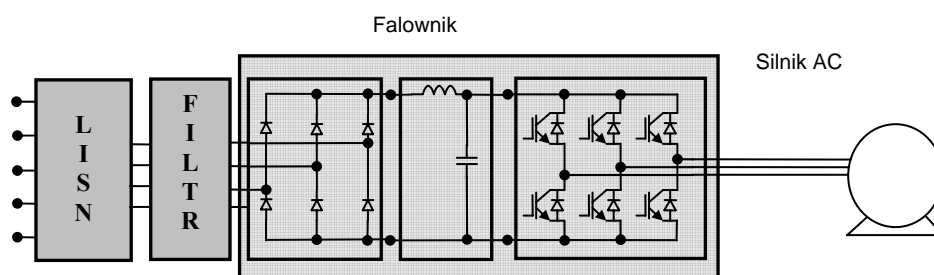
Ryc. 1. Schemat laboratoryjnego układu napędowego z przetwornicą step-down

Fig. 1. Scheme of laboratory converter drive with step-down converter

Drugi układ napędowy zrealizowano, opierając się na typowym przemysłowym przekształtniku typu LG SV 022ig5-4 ze sterowaniem PWM, który stosowany jest do zasilania silnika asynchronicznego. Podstawowe dane techniczne obejmują:

- napięcie zasilania – 400 V (3 fazy),
- prąd wejściowy – 7,2 A,
- maksymalne napięcie wyjściowe 0–400 V,
- maksymalny prąd wyjściowy – 6 A,
- częstotliwość wyjściowa – 0,1–400 Hz,
- silnik asynchroniczny SZJe 34B,  $P = 4$  kW,  $U = 380$  V,  $I = 8,7$  A,  $n = 1430$  r.p.m.

Schemat systemu falownikowego pokazano na ryc. 2.



Ryc. 2. Schemat układu 3-fazowego napędu falownikowego

Fig. 2. Scheme of 3-phase converter drive

## 5. Wyniki pomiarów

Badania zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych przeprowadzone zostały według zaleceń normy PN-EN 61800-3 [4], dotyczącej zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej układów napędowych, w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz, dla którego podane są wartości dopuszczalne zaburzeń. Podczas badań dokonano pomiaru zaburzeń przewodzonych asymetrycznych za pomocą trójfazowej sieci sztucznej „V” firmy Schwarzbek Mess-Elektronik typu NSLK 8126 o prądzie znamionowym  $4 \times 16$  A. Jako miernik zaburzeń zastosowano analizator widma firmy Advantest typu R3131A o zakresie pomiarowym od 9 kHz do 3 GHz.

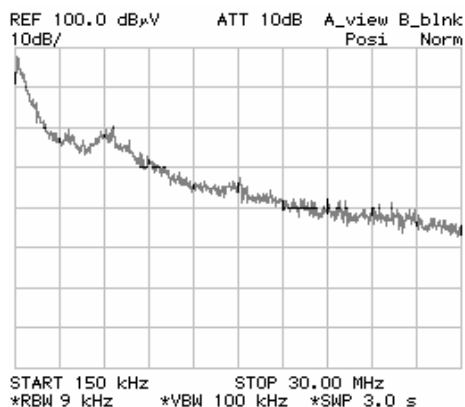
Wykonano pomiary wstępne dla całego zakresu częstotliwości używając detektora wartości szczytowej, a dla wybranych przedziałów pasma użyto detektora quasi-szczytowego. Szybkość przestrajania automatycznego częstotliwości oraz filtry rozdzielczości analizatora widma zostały ustawione zgodnie z zaleceniami CISPR odpowiednio do zakresu częstotliwości i zastosowanego rodzaju detekcji.

Uzyskane wyniki pomiarów dla dwóch rodzajów napędów przekształtnikowych: napędu prądu stałego oraz napędu prądu przemiennego wykazują mniejszy o ok. 20–30 dB $\mu$ V poziom zaburzeń przewodzonych w paśmie od 150 kHz do 30 MHz dla układu z przetwornicą 5-fazową i silnikiem szeregowym (ryc. 3 i 7). Pomiary z użyciem detektora quasi-szczytowego dla wybranego fragmentu pasma częstotliwości od 150 do 500 kHz wykazują różnicę wynoszącą ok. 10–20 dB $\mu$ V (ryc. 5 i 9).

Zastosowanie jednego ze środków ograniczenia zaburzeń przewodzonych w postaci gotowego filtra w.c.z., przeznaczonego dla systemów przekształtnikowych, pozwoliło na obniżenie poziomu generowanych zaburzeń elektromagnetycznych na zaciskach wejściowych obu systemów napędowych. W przypadku napędu falownikowego i pomiaru z detektorem wartości szczytowej poziom zaburzeń został obniżony maksymalnie o 40 dB $\mu$ V w przedziale częstotliwości od 150 do 500 kHz (ryc. 8), co potwierdzają również wyniki otrzymane z zastosowaniem detekcji quasi-szczytowej (ryc. 10). Dla drugiego badanego układu napędowego z silnikiem szeregowym prądu stałego zainstalowanie tego samego filtra przeciwzakłócenieniowego pozwoliło obniżyć poziom zaburzeń w miejscu zasilania układu o ok. 50 dB $\mu$ V dla pomiarów detektorem szczytowym i pasma od 150 do 500 kHz (ryc. 4), co również zostało zarejestrowane detektorem quasi-szczytowym (ryc. 6).

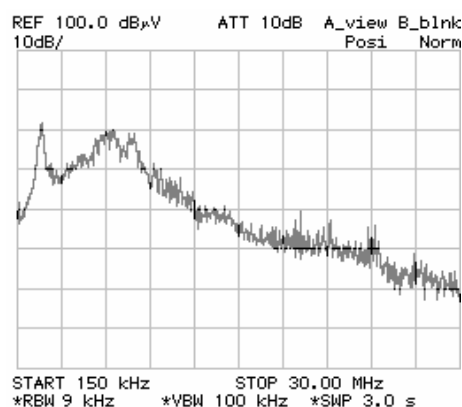


### Wyniki dla układu z falownikiem



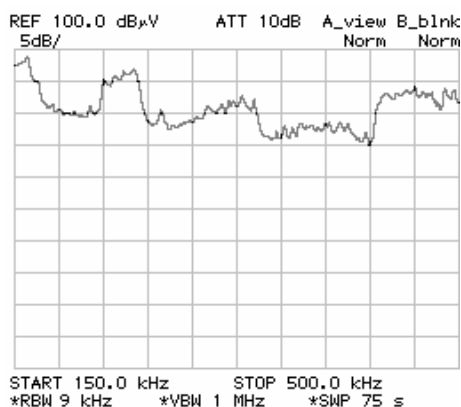
Ryc. 7. Poziom zaburzeń ( $P$ ) – bez filtru

Fig. 7. Level of interferences ( $P$ ) – without filter



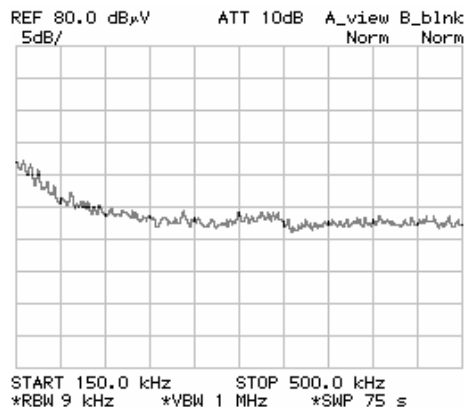
Ryc. 8. Poziom zaburzeń ( $P$ ) – z filtrem

Fig. 8. Level of interferences ( $P$ ) – with filter



Ryc. 9. Poziom zaburzeń ( $QP$ ) – bez filtru

Fig. 9. Level of interferences ( $QP$ ) – without filter



Ryc. 10. Poziom zaburzeń ( $QP$ ) – z filtrem

Fig. 10. Level of interferences ( $QP$ ) – with filter

## 6. Uwagi końcowe

Problematyka zaburzeń elektromagnetycznych pochodzących od przekształtników trakcyjnych jest nowym zagadnieniem w Polsce. W przypadku układów rzeczywistych ogromnie trudnym problemem jest poprawny dobór i zamontowanie filtru [5] oraz przestrzeganie innych metod obniżania zakłóceń, które powinny być redukowane już na etapie projektowania przez:

- ekranowanie urządzeń energoelektronicznych,
- ekranowanie i uziemianie kabli,
- stosowanie specjalnych uziemień.

#### Literatura

- [1] Ferreira J.A., van Wyk J.D., *Electromagnetic Energy Propagation in Power Electronic Converters: Toward Future Electromagnetic Integration*, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 6, June 2001.
- [2] Ferreira J.A., van Wyk J.D., *Evaluation and Future Prospects of an Integration Technology for Hybrid Multikilowatt Power Electronic Converters*, EPE 97, Trodheim.
- [3] Rickmer Heubeck, *Low Profile High Power Module with Fewer Parts to Handle*, PCIM EUROPE 2000/6.
- [4] PN-EN 61800-3 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) z uwzględnieniem specjalnych metod badań. Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości.
- [5] Czuchra W., Kowalczewski M., Zając W., *Methods of reducing electromagnetic interference generated by trams with asynchronous motors*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC EUROPE 2002, September 9–13, Sorrento, Włochy.
- [6] Czuchra W., Kowalczewski M., Zając W., *Zagadnienia doboru filtrów przeciwzakłóceńowych dla przekształtnikowych napędów trakcyjnych*, Konferencja MET 2003, Warszawa.
- [7] Kowalczewski M., Mysiński W., Zając W., *A step-down multi-phase converter, based on IGBT technology, for traction applications*, 10<sup>th</sup> International Conference EPE-PEMC 2002 Cavtat & Dubrovnik 9–11 September 2002, Chorwacja.