

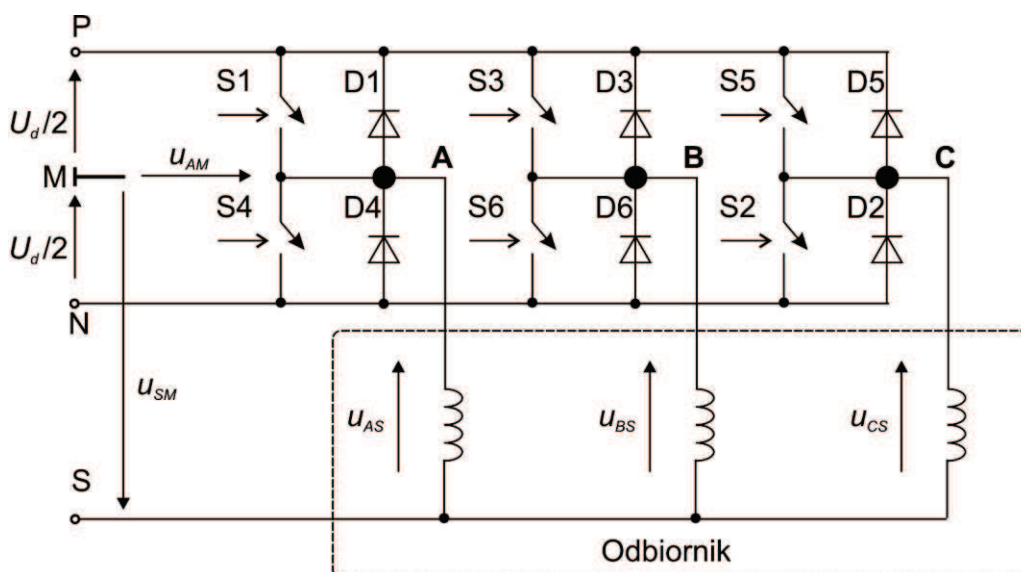
## Wybrane aspekty zaburzeń generowanych przez przemienniki częstotliwości

W artykule przedstawiono i omówiono różne sposoby zasilania silnika poprzez falownik. Zaprezentowano ponadto wyniki pierwszego etapu badań falownika PWM o mocy 1,5 kW przy różnych konfiguracjach jego układu zasilania.

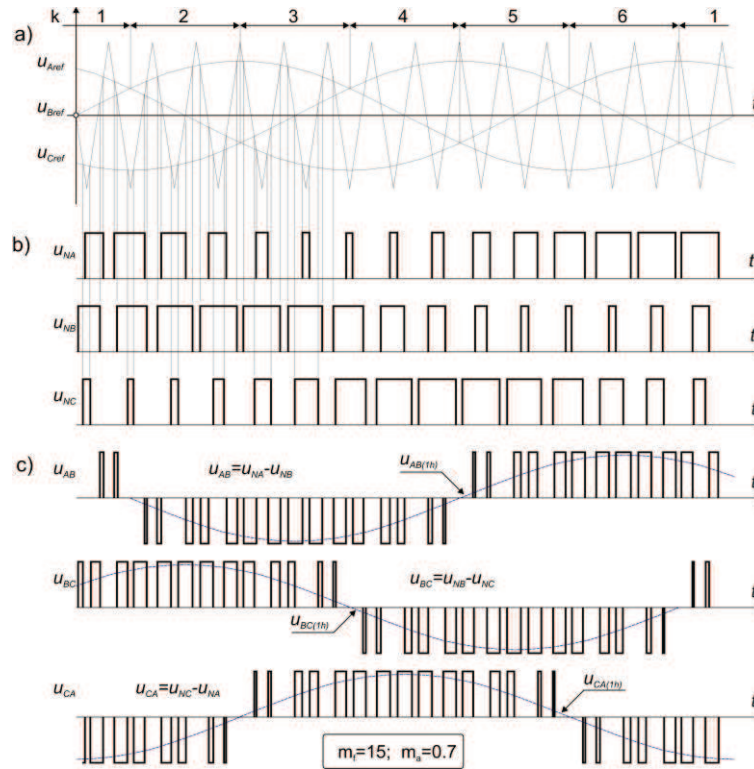
### 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój energoelektroniki i przetworników statycznych stawia coraz to nowe wyzwania dla personelu zajmującego się eksploatacją układów napędowych nie tylko od strony układów automatyki, ale również ich negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą. Ciągłe wzrastająca liczba i moc napędów górniczych z roku na rok wzmaga problematykę zaburzeń towarzyszących pracy przemienników częstotliwości.

Jednym z najczęściej spotykanych w eksploatacji przetworników statycznych są falowniki PWM zwane popularnie przemiennikami częstotliwości, a stosowane często w układach napędowych z silnikami prądu przemiennego. Zasilane z pośredniczącego obwodu prądu stałego ( $U_d$ ), przekształcają energię do postaci trójfazowej przy możliwie najwierniejszym sinusoidalnym kształcie napięć wyjściowych. Podstawowy układ takiego falownika przedstawiono na rys. 1, gdzie jako S1-S6 oznaczono półprzewodnikowe przyrządy mocy, najczęściej tranzystory IGBT.



Rys. 1. Uproszczony schemat trójfazowego falownika napięcia



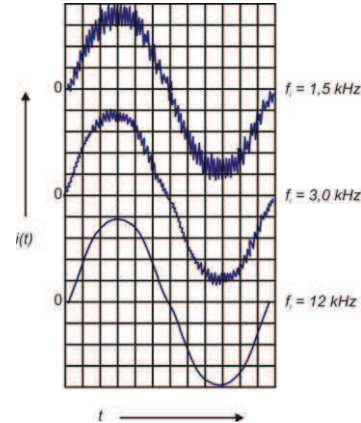
Rys. 2. Zasada kształtowania napięć wyjściowych falownika MSI  
 a) przebiegi zadające, b) napięcia pomiędzy punktem N układu a zaciskiem fazy wyjściowej,  
 c) wyjściowe napięcia międzyfazowe

Uzyskanie sinusoidalnego przebiegu napięcia możliwe jest poprzez kształtowanie jego każdej połówki z odpowiednio wygenerowanego ciągu impulsów o zmiennej szerokości (metoda MSI – modulacja szerokości impulsów; ang. PWM).

Konieczność zapewnienia sinusoidalnego przebiegu napięć wyjściowych wynika z faktu, iż wyższe harmoniczne napięć zasilających stojan silnika – generując współ- i przeciwbieżnie wirujące pola – zwiększają straty cieplne i wywołują momenty pasożytnicze. Im większa jest więc częstotliwość przebiegu piłokształtnego (rys. 2), tym bardziej przebieg napięcia wyjściowego, opisany zmianą średniej wartości ciągu impulsów w czasie półokresu, przybliży się do sinusoidalnego napięcia odniesienia  $U_{ref}$ . Wartość częstotliwości kluczkowania  $f_i$  we współczesnych falownikach waha się w granicach od kilku do kilkunastu kHz.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów wyjściowych falownika dla trzech różnych wartości częstotliwości kluczkowania.

Duże wartości częstotliwości kluczkowania zaworami falownika z jednej strony zapewniają, co prawda mało odkształcony przebieg prądu silnika, z drugiej zaś strony łatwiej przenikają do układu zasilania poprzez pojemności kabli zasilających i pojemności doziemne uzwojeń stojana silnika. Wywołane tym zjawiskiem zaburzenia elektromagnetyczne zakłóca-



Rys. 3. Przebiegi prądów wyjściowych falownika dla różnych wartości częstotliwości kluczkowania  $f_i$

ją pracę wrażliwych układów automatyki, pomiarów i monitoringu (RFI – Radio Frequency Interference). Dlatego też na odcinku od przemiennika do silnika stosuje się kable ekranowane, ograniczając przy tym ich długość, z uwagi na ich pojemnościowy charakter.

W przypadku, gdy napęd ma być używany w obszarze wrażliwym na zakłócenia elektromagnetyczne producenci zalecają stosowanie różnych filtrów w celu ograniczenia niepożądanych zakłóceń elektromagnetycznych, generowanych przez przemiennik, a propagowanych przez kable.

Przekształtniki stanowią ponadto źródło prądowe wyższych harmonicznych generowanych do sieci zasilającej. Dopuszczalny poziom emisji zaburzeń jest to maksymalna wartość zaburzeń generowanych przez dane urządzenie, która nie powinna zostać przekroczona. Poziom emisji zaburzeń często jest określany w wartościach bezwzględnych, np. bezwzględna wartość prądu określonej harmonicznej. W tabeli 1 podano przykładowo dopuszczalne poziomy emisji dla niektórych harmonicznych prądu w sieciach nn wyrażone w amperach [1].

**Tabela 1**  
**Dopuszczalne poziomy emisji**  
**wg PN-EN 61000-3-2:2007**

Rząd harmonicznej	Dopuszczalny poziom emisji [A]	
	Klasa A	Klasa B
5	1,14	1,710
7	0,77	1,155
11	0,33	0,495
13	0,21	0,315

W praktyce producenci urządzeń poddają swe urządzenia tym badaniom, podają klasę poziomu emisji zakłóceń, opierając się o wytyczne norm takich jak PN-EN 50178, IEC-1000-3-2 czy też IEEE 519-1992 [4].

Z uwagi na wzrastające wartości mocy i liczbę instalowanych przemienników, problematyka ich negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą jest coraz częściej poruszana [3,4].

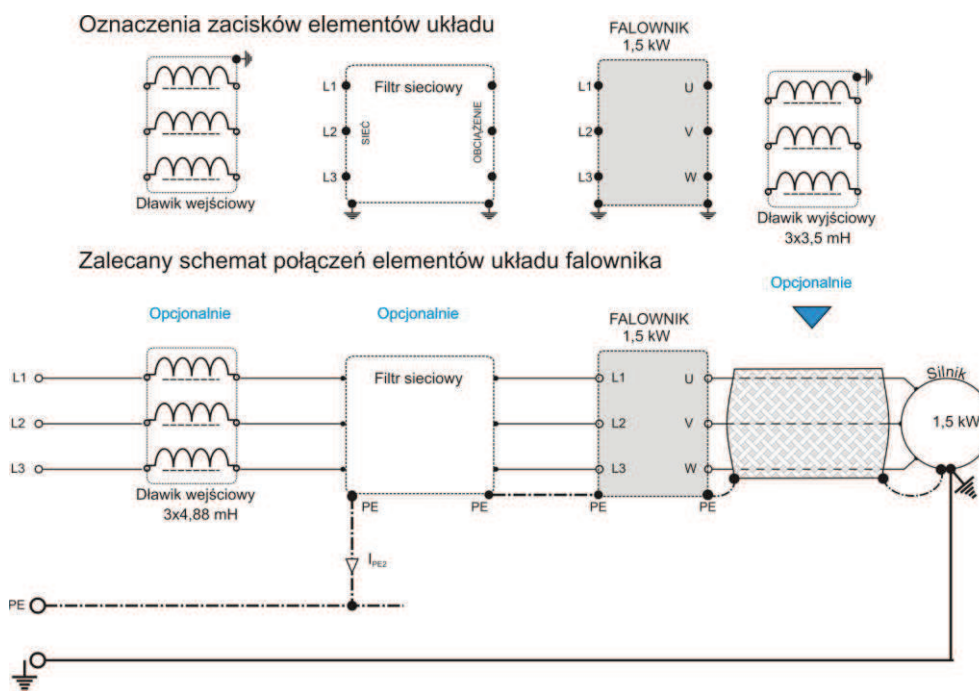
## 2. OPCJONALNE ELEMENTY UKŁADU ZASILANIA FALOWNIKA

Do opcjonalnych elementów układów zasilania falownika można zaliczyć:

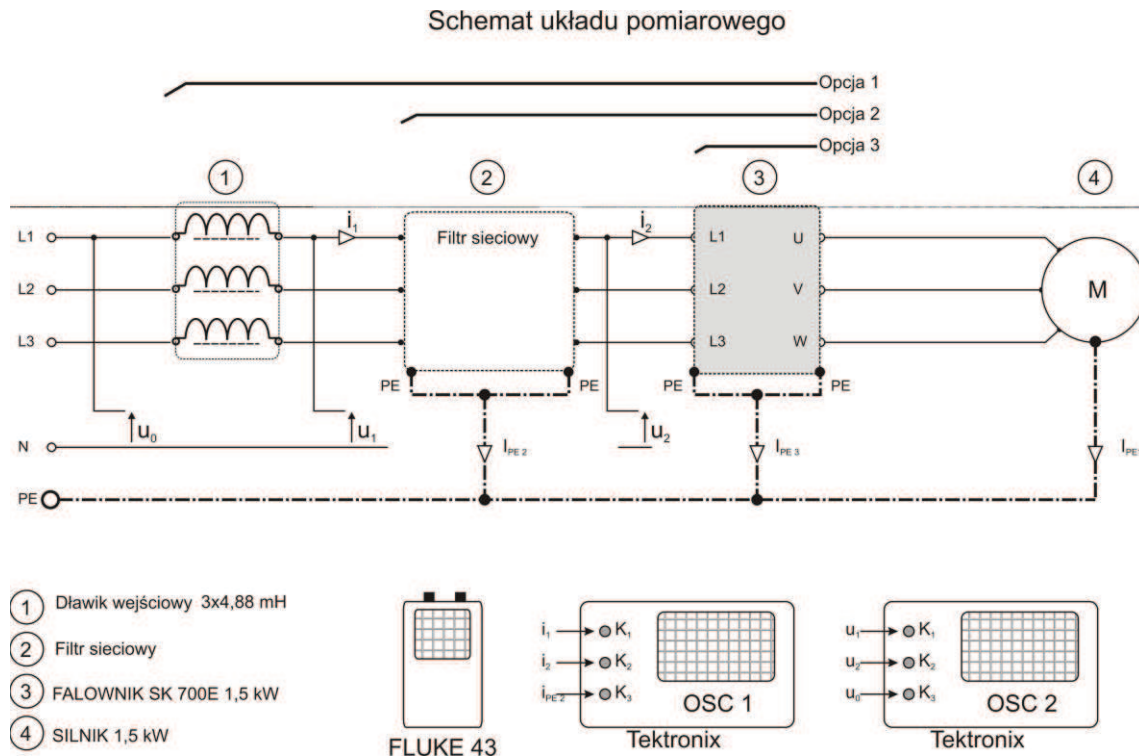
- **Filtr sieciowy** – zapewnia on poziom tłumienia emitowanych zakłóceń w klasie A lub B przy ściśle określonej przez producenta długości kabla. Należy go montować możliwie blisko przemiennika. Spotyka się różne jego wykonania w zależności od typu przemiennika;
- **Dławik wejściowy** (sieciowy) – ma za zadanie redukcję pulsacji prądu wejściowego poprzez wprowadzenie indukcyjności w obwód sieci;
- **Dławik wyjściowy** (obciążeniowy) – ma na celu redukcję sygnałów zakłócających emitowanych przez kabel silnika jak również kompensację pojemności długich ekranowanych kabli silnikowych.

W zależności od stopnia wyposażenia układu zasilania w poszczególne dławiki i filtry jak i maksymalnej długości użytych kabli ekranowanych, zastosowane rozwiązanie powinno spełniać wymagania jednej z klas zgodności elektromagnetycznej [EMC], odnośnie do emisji zaburzeń emitowanych przez ten układ.

Na rys. 4 przedstawiono przykładowy układ zasilania silnika o mocy 1,5 kW poprzez falownik i opcjonalnie dołączone elementy układów filtrujących, mające na celu ograniczanie skutków nie tylko zaburzeń elektromagnetycznych, ale także oddziaływania falownika na sieć zasilającą.



Rys. 4. Przykładowy układ zasilania silnika poprzez falownik (zalecany przez producenta)



Rys.5. Układ pomiarowy poszczególnych opcji zasilania silnika poprzez falownik

Należy zwrócić uwagę na powracającą ciągle dyskusyjną problematykę sposobu łączenia obudów poszczególnych elementów układu do przewodów ochronnych (łączenie przewodów ochronnych PE wraz z dodatkowym uziemieniem silnika). Przy większej liczbie podobnych układów oraz zalecanym sposobie łączenia obudów, pojawia się dodatkowa droga przepływu prądów błądzących. I tak w przewodach PE przy znacznej liczbie zainstalowanych falowników stwierdzano obecność prądów o dużej zawartości wyższych harmonicznych rzędu kilkudziesięciu amperów wartości skutecznej.

Dodatkową niejasność wprowadzają oznaczenia zacisków „uziemiających” elementów układu (rys. 4) inne niż te uwidocznione na schemacie połączeń (PE - ).

### 3. BADANIA RÓŻNYCH OPCJI ZASILANIA SILNIKA

Celem przeprowadzonych badań było stwierdzenie czy i w jakim stopniu poszczególne elementy układu przedstawione na rys. 4 wpływają na stopień odkształcenia prądów i napięć sieci zasilającej. Badania przeprowadzono w układzie przedstawionym na rys. 5.

Silnik o mocy 1,5 kW podłączono do falownika krótkimi przewodami nieekranowanymi z pominięciem dławika wyjściowego 3 × 3,5 mH.

W pierwszej opcji zasilania (maksymalna liczba elementów układu) falownik 3 przyłączono do trójfazowej sieci zasilającej 3 × 400 V za pośrednictwem filtra sieciowego 2 (rys. 5) oraz dławika wejściowego 1. Wszystkie obudowy przyłączono do przewodu ochronnego PE, monitorując poszczególne prądy upływnościowe  $I_{PE2}$  (filtra sieciowego) i  $I_{PE3}$  (falownika) przy pomocy cewek Rogowskiego jak i cęgów pomiarowych. Cęgami pomiarowymi monitorowano ponadto wejściowy prąd fazowy  $i_1(t)$  filtra 2 oraz wejściowy prąd fazowy  $i_2(t)$  falownika 3.

Próba użycia cewek Rogowskiego, jako elementów monitorujących przebiegi prądów podyktowana była ich cechą wzmacniania prądów wyższych częstotliwości w związku ze spodziewanymi prądami upływowymi, płynącymi poprzez pojemności doziemne faz silnika. Niestety zbyt małe wartości tych prądów (małe pojemności) indukowały w cewkach nie nadające się do analizy szumy. Dlatego też na tym etapie badań zrezygnowano z cewek Rogowskiego, które planuje się wykorzystać w drugim etapie badań w układach napędowych o znacznie większych wartościach mocy.

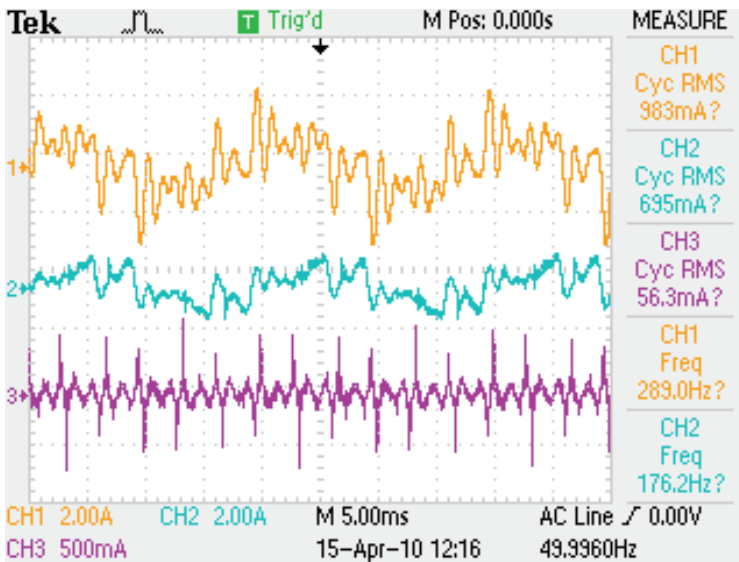
#### 3.1. Pomiary w opcji 1 układu zasilania

W ramach pomiarów zarejestrowano przebiegi prądów i napięć fazowych po stronie zasilania falownika, wykonano analizy wyższych harmonicznych w tych przebiegach. Zarejestrowane przebiegi prądów i napięć układu przedstawiono na rys. 6 i 7.

Należy zwrócić uwagę na stosunkowo znaczną wartość (ok. 0,7 A w impulsie) prądu doziemnego filtra sieciowego  $i_{PE2}$ , który wpływa do przewodu ochronnego PE. (rys. 6).

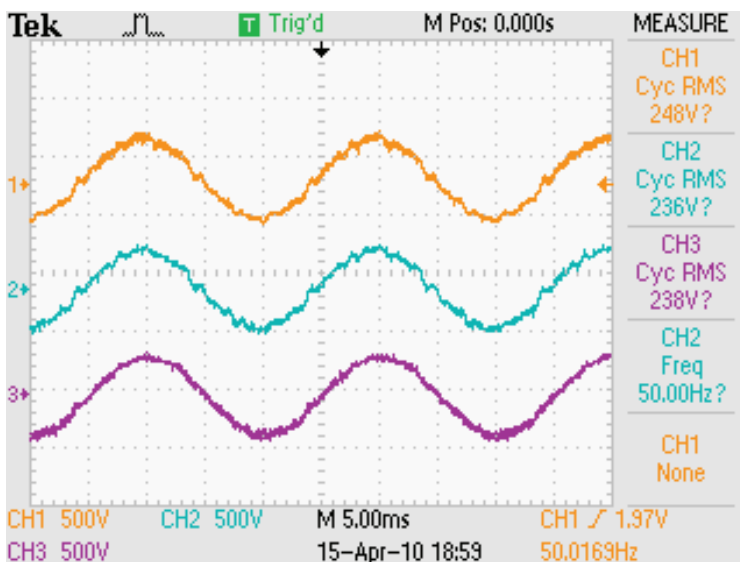
Przedstawione na rys. 7 przebiegi napięć fazowych

w poszczególnych punktach układu pozostają praktycznie nieodkształcone. Natomiast zawartość wyższych harmonicznych w tych przebiegach maleje w miarę „zbliżania się” do zacisków sieci zasilającej.



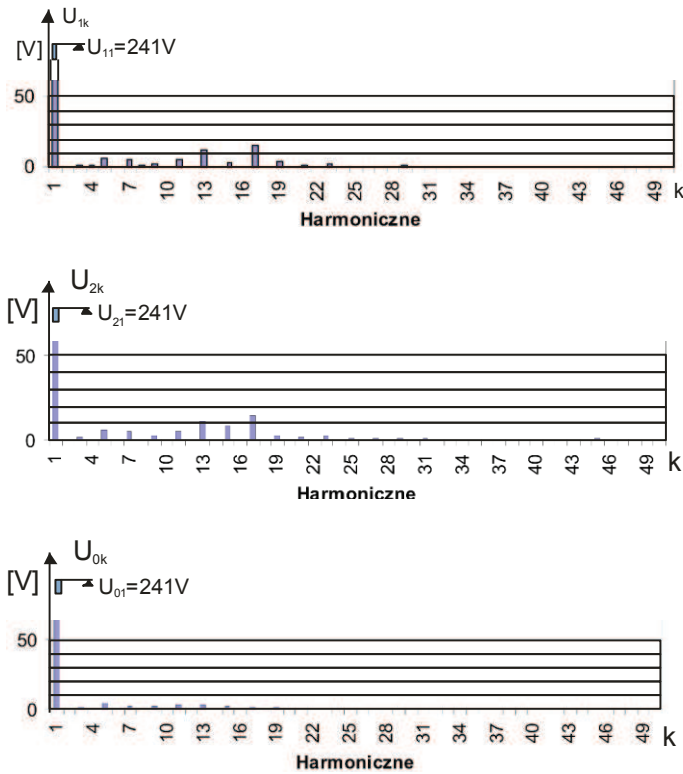
CH1 -  $i_1$  (prąd pobierany z sieci  
przez cały układ)  
CH2 -  $i_2$  (prąd pobierany przez  
falownik – po filtrze)  
CH3 -  $i_{PE2}$  (doziemny prąd filtra  
sieciowego 2)

Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi prądów układu wg opcji 1



CH1 -  $u_1$  (napięcie fazowe przed  
filtrem sieciowym)  
CH2 -  $u_2$  (napięcie fazowe po  
filtrze sieciowym)  
CH3 -  $u_0$  (napięcie fazowe na  
zaciskach sieci)

Rys. 7. Zarejestrowane przebiegi napięć fazowych układu wg opcji 1 zasilania

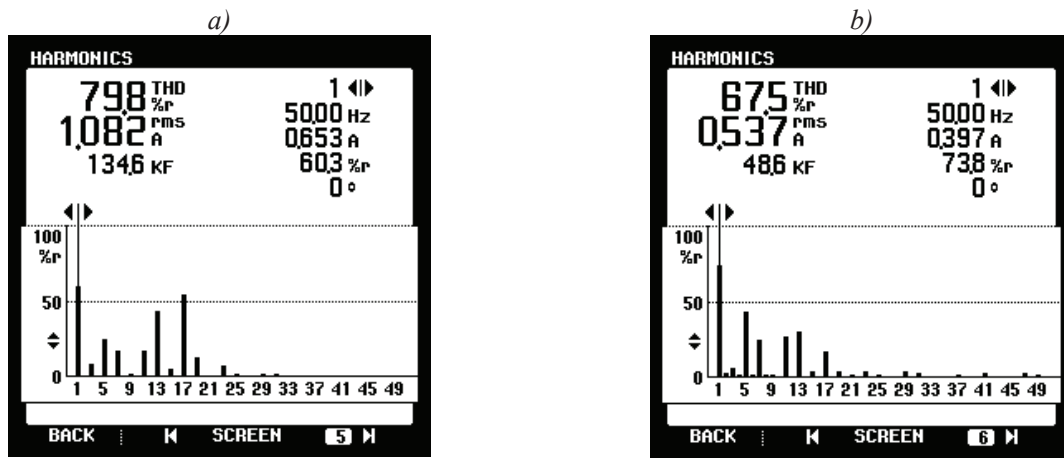


Wyższe harmoniczne  $u_{1k}$  napięcia fazowego  $u_1$  przed filtrem sieciowym

Wyższe harmoniczne  $u_{2k}$  napięcia fazowego  $u_2$  po filtrze sieciowym

Wyższe harmoniczne  $u_{0k}$  napięcia fazowego  $u_0$  na zaciskach sieci

Rys. 8. Zarejestrowane wartości wyższych harmonicznych napięć fazowych układu wg opcji 1 zasilania



Rys. 9. Zarejestrowane harmoniczne prądów fazowych układu wg opcji 1  
a)  $i_1$  (prądu pobieranego z sieci przez cały układ), b)  $i_2$  (prądu pobieranego przez falownik)

Biorąc pod uwagę stopień odkształcenia prądu (THDi) okazuje się, że współczynnik ten dla prądu pobieranego z sieci jest znacznie większy od jego wartości zmierzonej dla prądu pobieranego przez sam falownik. Wynika to z faktu zamykania się

wyższych harmonicznych przez gałąź poprzeczną filtra sieciowego.

Wartości poszczególnych harmonicznych prądów  $i_1$  i  $i_2$  z rys. 6 zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

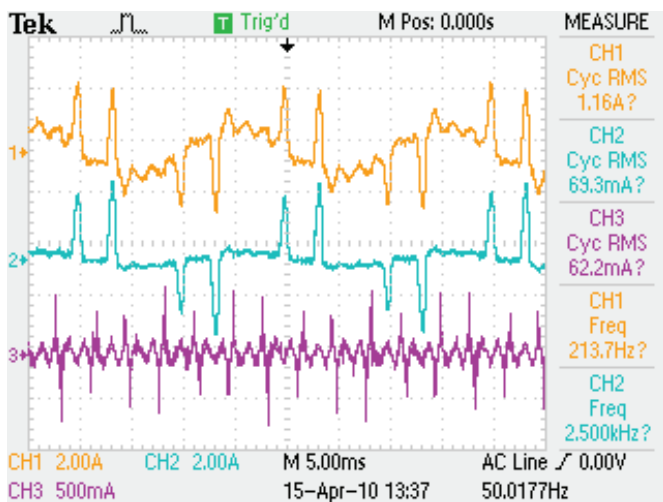
Zestawienie wartości wyższych harmonicznych prądów  $i_1(t)$  i  $i_2(t)$  [opcja 1]

Rząd wh »	Wartość RMS	1	5	7	11	13	17	19
-	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
$i_1$ (sieć)	1,05	0,65	0,26	0,19	0,17	0,45	0,59	0,13
$i_2$ (falownik)	0,54	0,40	0,23	0,14	0,14	0,16	0,10	-----

Tabela 2

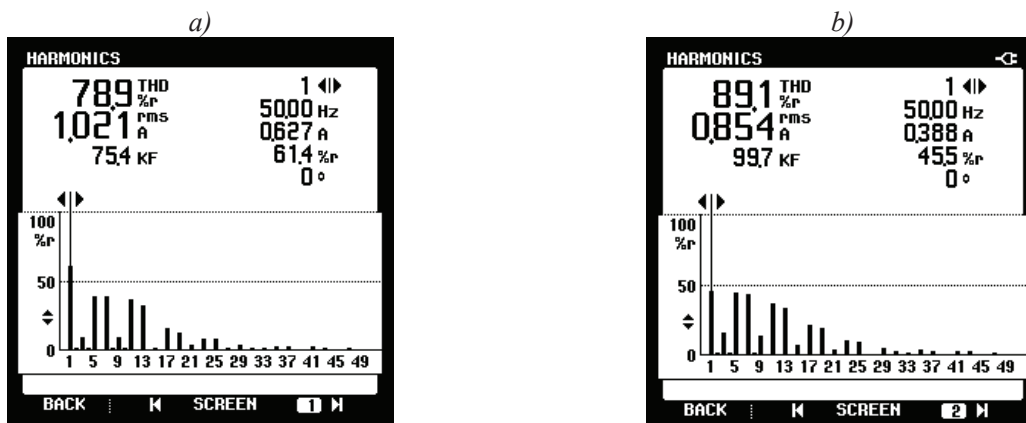
Zestawienie wartości wyższych harmonicznych prądów  $i_1(t)$  i  $i_2(t)$  [opcja 2]

Rząd wh »	Wartość RMS	1	5	7	11	13	17	19
-	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
$i_1$ (sieć)	1,01	0,63	0,40	0,38	0,36	0,32	0,16	0,13
$i_2$ (falownik)	0,88	0,39	0,38	0,37	0,32	0,28	0,18	0,15



CH1 –  $i_1$  (prąd pobierany z  
sieci)  
CH2 –  $i_2$  (prąd pobierany przez  
falownik – po filtrze)  
CH3 –  $i_{PE2}$  (doziemny prąd filtra  
sieciowego 2)

Rys. 10. Zarejestrowane przebiegi prądów układu wg opcji 2 (brak dławika sieciowego)

Rys. 11. Zarejestrowane harmoniczne prądów fazowych układu wg opcji 2  
c)  $i_1$  (prądu pobieranego z sieci); d)  $i_2$  (prądu pobieranego przez falownik)

Nie udało się natomiast wyznaczyć widma wyższych harmonicznych w prądzie doziemnym  $i_{PE2}$  filtra sieciowego za pomocą analizatora Fluke 43, ponieważ w prądzie tym praktycznie nie występuje harmoniczna 50 Hz. Z uzyskanego przebiegu tego prądu (rys. 6) wynika, że dominującą harmoniczną jest harmoniczna 15.

### 3.2. Pomiary w opcji 2 układu zasilania

W tej opcji zasilania falownik przyłączono do sieci zasilającej za pośrednictwem filtra sieciowego z pominięciem dławika sieciowego (rys. 5). Przebiegi prądów  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  oraz  $i_{PE2}$  przedstawiono na rys. 10.

Pominięcie dławika wejściowego zdecydowanie pogorszyło przebiegi prądów  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ , dodając w efekcie impulsy prądowe charakterystyczne dla procesu doładowywania obwodu pośredniczącego falownika.

Odształcenie napięć w poszczególnych punktach obwodu nie uległo zasadniczej zmianie w odniesieniu do 1 opcji zasilania.

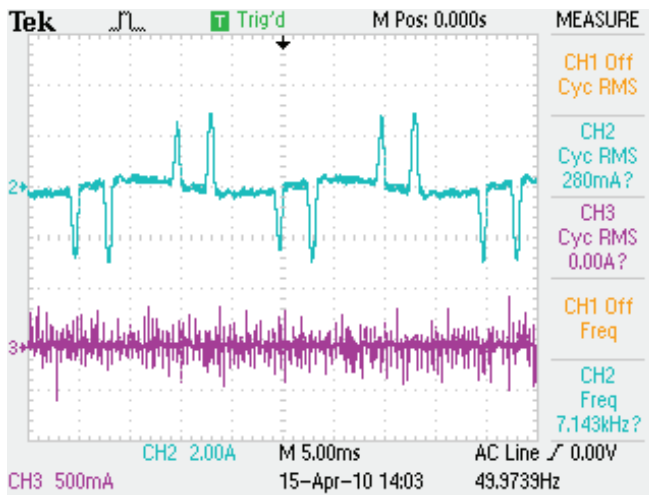
Współczynnik odształcenia THD<sub>i</sub> prądu  $i_1$  pobieranego z sieci jest mniejszy od jego wartości określonej dla prądu  $i_2$  pobieranego przez falownik (rys. 11). Wartości poszczególnych harmonicznych obu prądów zamieszczono w tabeli 2.

### 3.3. Pomiary w opcji 3 układu zasilania

Pomiary wykonano dla falownika przyłączonego bezpośrednio do zacisków sieci zasilającej z pominięciem dławika i filtra sieciowego. Na rys. 12 przedstawiono zarejestrowane przebiegi prądu pobieranego z sieci oraz prądu doziemnego  $i_{PE3}$  falownika. Z uwagi na małe wartości prądu doziemnego jak i jego charakter nie podjęto próby jego interpretacji. Znaczne zwiększenie mocy silnika i falownika – w planowanym drugim etapie badań – zwiększy ich pojemno-

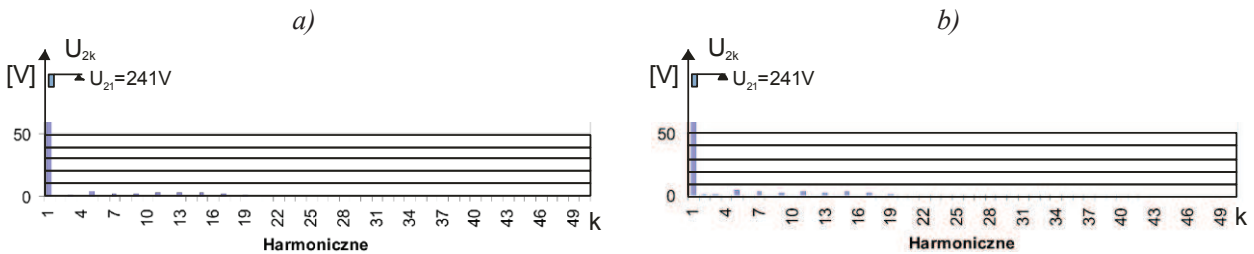
ści doziemne, a co za tym idzie prądy doziemne wysokiej częstotliwości. Zastosowanie w tym układzie cewek Rogowskiego do ich monitorowania będzie miało uzasadnienie i powinno pozwolić na dokładną interpretację uzyskanych tą drogą wyników.

Odkształcenie napięcia sieci zasilającej pozostawało praktycznie stałe dla wszystkich opcji zasilania. Porównanie harmonicznego napięcia sieci obciążonej falownikiem i napięcia przy odłączonym falowniku przedstawiono na rys. 13. Harmoniczne prądu sieci w 3 opcji zasilania pokazano na rys. 14.

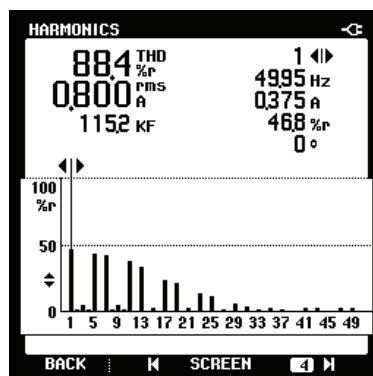


CH1 –  
 CH2 -  $i_2$  (prąd pobierany z sieci przez falownik)  
 CH3 -  $i_{PE3}$  (prąd doziemny falownika)

Rys. 12. Zarejestrowany przebieg prądu układu wg opcji 3 zasilania (sam falownik)



Rys. 13. Wyższe harmoniczne w napięciu sieci  
 a) przy załączonym falowniku w opcji 3 zasilania;  
 b) przy odłączonym falowniku



Rys. 14. Harmoniczne prądu sieci w 3 opcji zasilania



Tabela 3

## Porównanie wyższych harmoniczných prądów sieci różnych opcji zasilania

Rząd wh »	THDi	RMS	1	5	7	11	13	17	19
-	%	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
i (opcja 1)	79,8	1,05	0,65	0,26	0,19	0,17	0,45	0,59	0,13
i (opcja 2)	78,9	1,01	0,63	0,40	0,38	0,36	0,32	0,16	0,13
i (opcja 3)	88,4	0,80	0,36	0,34	0,33	0,29	0,28	0,19	0,19

W tabeli 3 przedstawiono wartości współczynnika odkształcenia THDi prądu pobieranego z sieci oraz wartości harmoniczných dla poszczególných opcji zasilania.

W tabeli zaznaczono minimalne wartości prądów poszczególných harmoniczných. Opcja pierwsza – najbardziej rozbudowana – znacznie redukuje wartości emitowaných harmoniczných 5., 7. i 11.; harmoniczných, których maksymalne wartości prądów są określone normami (tabela 1).

Biorąc pod uwagę wartości współczynnika odkształcenia THDi prądu – opcja 1 zasilania charakteryzuje się najmniejszą jego wartością.

Z punktu widzenia elektroenergetyka zakładowego, bezdyskusyjna więc pozostaje sprawa czy zainwestować trochę więcej wyposażając falownik w opcjonalne układy redukujące zaburzenia generowane do sieci zasilającej, czy godzić się na rozwiązania oszczędne będące źródłem potencjalnych zakłóceń zarówno wysokiej, jak i niskiej częstotliwości.

- Maksymalnie rozbudowana opcja zasilania (1) charakteryzuje się najmniejszą wartością współczynnika odkształcenia prądu THDi.
- Zastosowanie filtra sieciowego spowodowało przepływ prądu 0,7 A w impulsie o częstotliwości 750 Hz (15. harmoniczna) w przewodzie ochronnym PE.
- Stwierdza się dużą niejednoznaczność w opisie zacisków uziemiających poszczególných elementów układu, sposobów uziemiań kabli, elementów oraz zamiennego używania pojęć „uziemić” i przewód ochronny.
- Z uwagi na możliwości użytych analizatorów badania ograniczono do 50. harmonicznej.
- Małe wartości prądów doziemnych wysokiej częstotliwości użytego silnika i falownika nie pozwoliły na ich dokładne monitorowanie z wykorzystaniem cewek Rogowskiego, dlatego też przeprowadzenie drugiego etapu badań planowane jest w układzie o znacznie większych wartościach mocy silnika.

## WNIOSKI, UWAGI KOŃCOWE

- Przeprowadzone badania układu napędowego małej mocy (1,5 kW) wykazały znaczący wpływ opcjonalnych jego elementów na zawartość wyższych harmoniczných w prądzie pobieranym z sieci.
- Największy wpływ na kształt prądu pobieranego z sieci należy przypisać szeregowemu dławikowi sieciowemu, który znacząco ogranicza impulsy prądowe filtra obwodu pośredniczącego falownika.

## Literatura

1. PN-EN 61000-3-2:2004 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-2: Dopuszczalne poziomy emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A).
2. EN 50081-2; EN 50082-2.
3. *Szymański J.*: Ochrona przed prądami dużých częstotliwości w instalacjach napędów przekształtnikowych w sieciach separowaných, Elektro Info nr 7/8 2008, str. 40-44.
4. *Szymański J.*: Harmoniczne prądu i napięcia w sieci zasilającej wprowadzane przez prostowniki wejściowe napędowych przemienników częstotliwości, Elektro Info nr 9 2007, str. 86-92.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

## SELECTED ASPECTS OF DISTURBANCES GENERATED BY CONVERTERS

The article features different methods of providing power supply to an engine through an inverter. Additionally, the article presents the results of the first phase of tests on a PWM inverter with the power of 1.5 kW at different configurations of its power supply system.

## ИЗБРАННЫЕ АСПЕКТЫ НАРУШЕНИЙ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ ЧЕРЕЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

В статье представлены и обсуждены различные способы питания двигателя через инвертор. Кроме того, представлены результаты первого этапа исследований инвертора PWM мощностью 1,5 кВт при разных конфигурациях его системы питания.