

**Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, ENEL-PC, Sp. z o.o., Gliwice**  
**Aleksander Bodora, Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, Gliwice**

## **STANOWISKO DO TESTÓW FILTRÓW SIECIOWYCH DLA NAPĘDÓW – BADANIA LABORATORYJNE**

### **SETUP FOR TESTING INPUT FILTERS FOR DRIVES – LABORATORY INVESTIGATION**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono stanowisko do badania filtrów wejściowych stosowanych docelowo w napędach prądu przemiennego. Stanowisko pozwala na testowanie rozwiązań przeznaczonych dla typowych układów wejściowych w napędach AC, jakimi są prostowniki diodowe oraz przekształtniki tranzystorowe (układy AFE – Active Front End) stosowane głównie w przypadku długotrwałego zwrotu energii do sieci. Celem stosowania stanowiska jest osiągnięcie w laboratorium warunków pracy jak najbardziej zbliżonych do występujących w miejscu rzeczywistej instalacji filtru, głównie w celu przeprowadzenia badań termicznych oraz sprawdzenia skuteczności tłumienia filtrów pasywnych stosowanych w napędach. W artykule omawia się budowę, właściwości, sterowanie nadrzędne realizowanego stanowiska oraz prezentuje się wybrane wyniki badań laboratoryjnych związanych z testami wybranych rozwiązań filtrów sieciowych.

**Abstract:** The paper presents a setup for testing input filters that are typically used in AC drive systems. The setup allows testing the input filters intended to use with typical line side converters in low voltage drive systems, like the diode rectifier or active front end converters (for energy recuperation). The main aim of using the setup is ensuring in the laboratory the operation conditions that are as close as possible to conditions in point of installation the drive system (power, current harmonics). The setup is especially used in thermal tests of the input filters and in checking the efficiency of damping of passive filters used in drive systems. The paper presents construction of the setup, its properties, the higher level control and parameterization of the setup (using PLC controller). Additionally selected results of the laboratory tests proofs proper operation of the setup.

**Słowa kluczowe:** filtry sieciowe, wpływ napędów prądu przemiennego na sieć, badania filtrów sieciowych, przekształtniki tranzystorowe

**Keywords:** AC line input filters, influence of AC drives on the mains, tests of line side AC filters, active front end converters

### **1. Wstęp**

Prostowniki diodowe 6-pulsowe są najczęściej stosowanymi rozwiązaniami w układach napędowych prądu przemiennego niskiego napięcia. Mimo swej prostoty ich negatywną cechą jest wysoki poziom generacji harmonicznego prądu. W celu ich ograniczenia stosuje się odpowiednie filtry pasywne, od najprostszych (dławiki sieciowe), do bardziej skomplikowanych zawierających np. filtry pasywne harmonicznego. Z drugiej strony w napędach, w których wymagany jest długotrwały zwrot energii do sieci, jako stopień wejściowy, wykorzystuje się prostowniki tranzystorowe (układy Active Front-End - AFE converters). W tym przypadku właściwy filtr jest niezbędny do pracy samego przekształtnika. Aby spełnić odpowiednie normy, np. PN-EN 61000-3-12 [1] określającą dopuszczalne poziomy harmonicznego w prądzie odbiorców, wymagane jest stosowanie

prawidłowo zaprojektowanych filtrów, dobieranych na moc obciążenia oraz widmo harmonicznego prądu wynikające z rzeczywistego stanu pracy napędu. Dla prostowników diodowych filtr jest projektowany na relatywnie wysokie poziomy harmonicznego niższych rzędów, a dla przekształtników AFE na częstotliwości wynikające z przełączeń tranzystorów [2]. Sprawdzenie poprawności działania filtru powinno odbywać się w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, szczególnie przy stosowaniu nowych materiałów magnetycznych [3]. Stąd pojawiła się potrzeba opracowania stanowiska badawczego, pozwalającego na badanie typowych rozwiązań filtrów dla układów napędowych przy różnych warunkach (moc, częstotliwość przełączeń tranzystorów). W prezentowanym stanowisku połączono obwodem pośredniczącym prostownik diodowy i przekształtnik

tranzystorowy, aby umożliwić testy filtrów sieciowych dla badanych rozwiązań. Układ zapewnia pobór mocy przez prostownik diodowy, a następnie jej zwrot przez przekształtnik tranzystorowy, co umożliwia badanie filtrów przy przepływie mocy znamionowej i równocześnie pokryciu z sieci zasilającej jedynie strat mocy. Podłączenie obu przekształtników do tej samej sieci mogłoby powodować przepływ prądów wyrównawczych (wynikających z różnic napięć chwilowych). W celu ich blokowania, w stanowisku zastosowano transformator separacyjny. Szczegółowy opis stanowiska i rolę innych elementów przedstawiono w dalszej części artykułu. Ideę działania stanowiska oraz wyniki badań symulacyjnych zaprezentowano natomiast w pracy [4].

## 2. Realizacja stanowiska do badań filtrów sieciowych

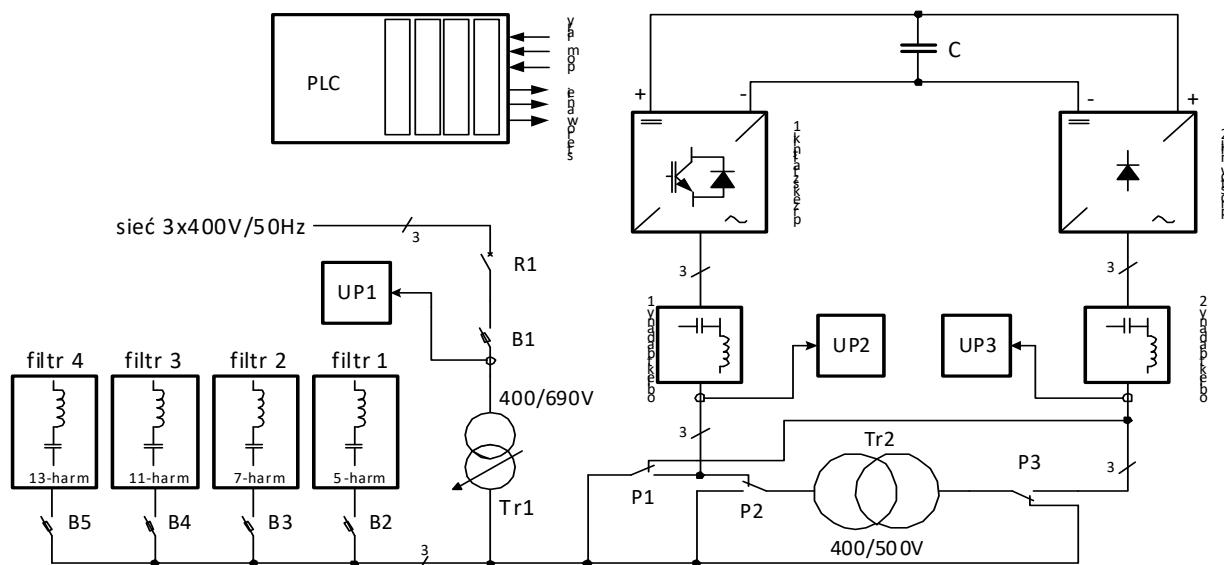
Prezentowane stanowisko charakteryzuje się:

- możliwością testowania rozwiązań filtrów dla prostowników diodowych i przekształtników tranzystorowych o mocach do 350 kVA,
- możliwością badania filtrów o napięciu 400 V i 690 V, przy zasilaniu stanowiska z sieci 400 V,
- możliwością ustawiania 8 częstotliwości łąceń w przekształtniku tranzystorowym,
- kontrolą mocy czynnej i biernej w przekształtniku tranzystorowym.

Schemat blokowy stanowiska został przedstawiony na rys. 1. Elementami podstawowymi są: *przekształtnik 1* (tranzystorowy, DC/AC) i *przekształtnik 2* (diodowy, AC/DC), połączone wspólną szyną DC z baterią kondensatorów. W głównym torze przepływu energii podłącza się testowane filtry sieciowe (*obiekt badany 1 i 2*), przy czym podłączone muszą być zawsze oba. Stany pracy każdego z filtrów monitorowane są za pomocą układów pomiarowych *UP2* i *UP3*.

Wymagana separacja realizowana jest za pomocą transformatora *Tr2*. Uniemożliwia to powstanie prądów wyrównawczych, np. gdy potencjał (dodatni lub ujemny) kondensatora będzie podłączony do innych faz w każdym z przekształtników. Transformator ma przekładnię 1,2, aby uzyskać wyższe napięcie DC dla przekształtnika tranzystorowego [4,5].

Pełne możliwości testowania skuteczności tłumienia filtrów uzyskuje się przy relatywnie niskiej impedancji sieci zasilającej. Dlatego w stanowisku zastosowano przełącznice *P1-P3* pozwalające na zmianę punktu podłączenia strony pierwotnej i wtórnej transformatora *Tr2*. Podczas testów *objektu badanego 1* transformator *Tr2* włączany jest między sieć, a przekształtnik tranzystorowy obniżając napięcie na jego zaciskach. Przy testowaniu *objektu badanego 2* transformator *Tr2* podłączony jest między sieć, a prostownik diodowy, podwyższając napięcie prostownika.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego

Transformator  $Tr2$  dobrano do zakresu mocy badanych filtrów z zapasem wynikającym z generacji mocy biernej i harmonicznych prądu w filtrach oraz z przekładni transformatora.

Ponieważ stanowisko pozwala na testowanie rozwiązań na napięciu 400 V i 690 V, transformator  $Tr2$  umożliwia zmianę konfiguracji uzwojeń. W przypadku pracy z napięciem 400 V uzwojenia są łączone w trójkąt (Dd0), natomiast dla 690 V w gwiazdę (Yy0). Ogranicza to moc znamionową transformatora. Zapewnienie zerowego przesunięcia godzinowego wynika z miejsca pomiaru napięcia sieci. Napięcia 400 V i 690 V są w stanowisku zapewnione przez transformator  $Tr1$ , przy czym dzięki miejscu przyłączenia jego moc może być ograniczona (prąd transformatora wynika ze strat mocy w przekształtnikach i elementach badanych oraz różnic wartości chwilowych prądów wejściowych obu przekształtników). W celu redukcji mocy transformatora, jak i mocy w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci zastosowano opcjonalne pasywne filtry harmonicznych  $filtr1$ – $filtr4$ . Filtry te pozwalają zredukować prądy poszczególnych harmonicznych, jednak wymagają generacji dodatkowej mocy biernej w przekształtniku tranzystorowym [4,5]. Przekształtnik tranzystorowy (*przekształtnik 1*) może również generować harmoniczne w prądzie i w ten sposób ograniczać wpływ badanych

filtrów na sieć lub intencjonalnie wprowadzać w pomiar określoną harmoniczną prądu [4].

Układem odpowiedzialnym za sterowanie elementami automatyki oraz przekształtnikiem tranzystorowym jest sterownik PLC. Zapewnia on odpowiedni interfejs użytkownika oraz zbieranie danych z układów pomiarowych  $UP1$  (parametry energii w punkcie przyłączenia do sieci) oraz  $UP2$  i  $UP3$  (parametry energii obu badanych filtrów).

Zdjęcie opracowanego i wykonanego stanowiska pokazano na rys. 2. W szafie po lewej stronie umieszczone zostały układy automatyki zabezpieczeniowej i sterowniczej, sterownik PLC oraz transformator  $Tr1$ . W środkowej szafie umieszczono przekształtniki wraz z układem sterowania oraz kondensatory pasywnych filtrów harmonicznych. W szafie po prawej stronie umieszczono dławiki filtrów harmonicznych oraz obwody przełącznicy wraz z zaciskami do podłączania badanych filtrów sieciowych. Poza szafą (ze względu na gabaryty) umieszczony został transformator  $Tr2$ .

### 3. Warstwa sterowania nadrzędnego

Nadrzędna warstwa sterowania została zrealizowana z wykorzystaniem sterownika przemysłowego PLC Simatic S7-1200 z wejściami/wyjściami tranzystorowymi.



Rys. 2. Stanowisko badawcze do testowania filtrów stosowanych w napędach

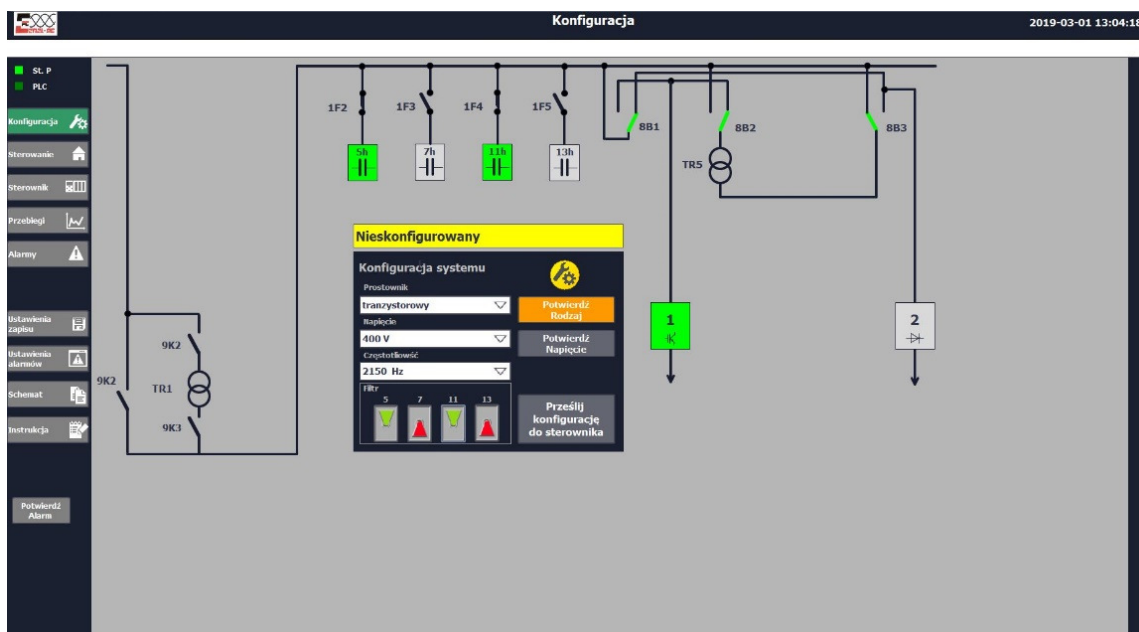
Sterownik rozbudowano o moduły analogowe oraz komunikacyjne RS-485. Warstwa sterowania nadrzędnego współpracuje z zainstalowaną na komputerze wizualizacją, przygotowaną w środowisku „Runtime”.

Głównym zadaniem sterownika PLC jest kontrola elementów elektromechanicznych systemu (przełącznice i styczniki) w taki sposób, aby uzyskać żądaną konfigurację obwodów silno-prądowych oraz zarządzanie pracą sterownika przekształtnika tranzystorowego. Sterownik PLC przesyła dane dotyczące konfiguracji systemu, sygnały sterujące pracą przekształtnika, wartości zadane mocy oraz odbiera dane statystyczne z przekształtnika. Komunikacja między sterownikiem PLC i przekształtnikiem tranzystorowym odbywa się poprzez odrębny kanał komunikacyjny w oparciu o protokół Modbus RTU, co zapewnia wydajną i szybką wymianę danych.

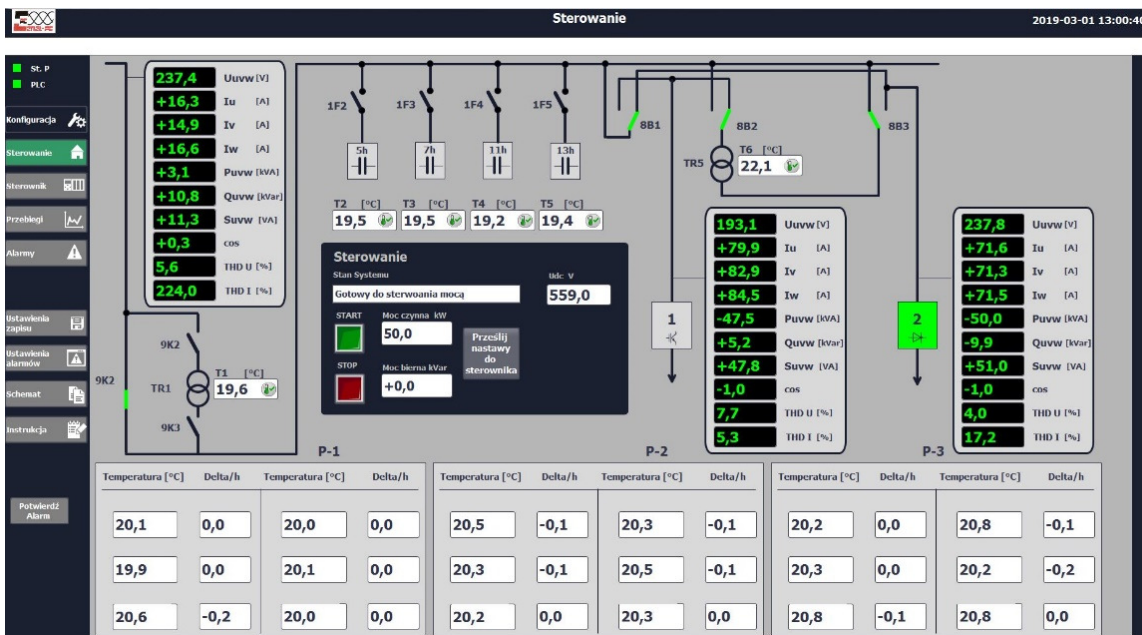
Ze względu na badawczy charakter stanowiska, przewidziano w nim rozbudowany system pomiarowy, na który składają się: mierniki parametrów sieci z interfejsem Modbus TCP, czujniki temperatury z przetwornikami z wyjściem prądowym oraz czujniki temperatury podłączone do przetworników z interfejsem Modbus RTU. Wszystkie te elementy zostały zintegrowane ze sterownikiem nadrzędnym, dzięki czemu możliwy jest ciągły pomiar, przetwarzanie oraz archiwizacja wybranych parametrów

elektrycznych oraz temperatur w stanowisku. Za pośrednictwem opracowanej aplikacji HMI zainstalowanej na komputerze możliwe jest monitorowanie i prezentacja wybranych wielkości pomiarowych w postaci liczbowej oraz w postaci przebiegów czasowych. Dodatkowo możliwe jest monitorowanie stanów alarmowych, takich jak: stany awaryjne w sterowniku przekształtnika tranzystorowego czy przekroczenie wartości granicznych temperatur.

Na rys. 3 pokazano widok ekranu konfiguracji stanowiska. Aby możliwe było uruchomienie przekształtnika, użytkownik musi zdefiniować topologię systemu pomiarowego, a w szczególności rodzaj badanego filtru (do współpracy z przekształtnikiem tranzystorowym lub diodowym), napięcie zasilania oraz częstotliwość przełączeń w przekształtniku tranzystorowym. Na tej podstawie, sterownik nadrzędny dokonuje przełączeń odpowiednich elementów automatyki łączeniowej w stanowisku oraz przesyła dane konfiguracyjne do sterownika przekształtnika tranzystorowego (po zatwierdzeniu poprawności konfiguracji). Po potwierdzeniu zmian konfiguracji przez sterownik przekształtnika tranzystorowego urządzenie sygnalizuje gotowość do pracy. Ekran konfiguracji dostępny jest tylko w czasie, kiedy urządzenie nie pracuje. W czasie normalnej pracy ekran jest nieaktywny.



Rys. 3. Aplikacja HMI – ekran konfiguracji stanowiska

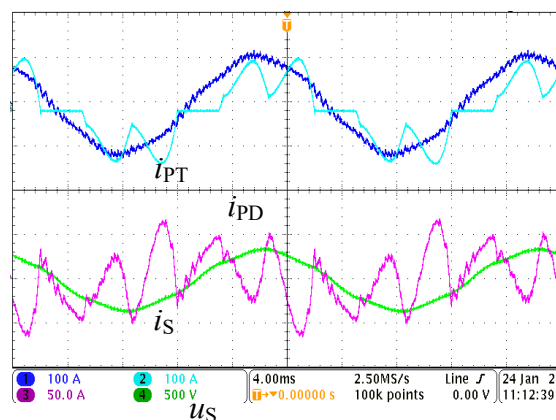


Rys. 4. Aplikacja HMI – ekran sterowania

Na ekranie, dzięki stykom pomocniczym ze styczników i przełącznic wizualizowany jest aktualny układ wszystkich połączeń w stanowisku. Jeśli nastąpi niezgodność między stanem zadanym a stanem monitorowanym (za pomocą styków pomocniczych) sytuacja taka jest sygnalizowana.

Na rys. 4 przedstawiono widok ekranu sterowania wykorzystywany podczas pracy stanowiska. Za pomocą tego ekranu, użytkownik ma możliwość wpływania na pracę urządzenia oraz wprowadzania wartości zadanych mocy czynnej oraz mocy biernej dla przekształtnika tranzystorowego. Na ekranie pokazana jest aktualnie badana konfiguracja. Dodatkowo prezentowane są wybrane parametry elektryczne mierzone w punkcie podłączenia do sieci oraz w miejscu podłączenia każdego z filtrów, a także temperatury z poszczególnych czujników rozmieszczonych w stanowisku i elementach badanych. Na ekranie prezentowane są alarmy i ostrzeżenia związane ze stanami awaryjnymi w przekształtniku oraz z przekraczaniem wartości progowych temperatur.

Za pomocą pozostałych ekranów, użytkownik może przeprowadzić konfigurację alarmów, konfigurację cyklu archiwizacji danych oraz odczytać dane statusowe sterownika przekształtnika. Możliwy jest dodatkowo podgląd stanu pracy układu w chwili wystąpienia awarii oraz podgląd przebiegów czasowych zmian temperatury z wybranych (na etapie konfiguracji) czujników temperatury.

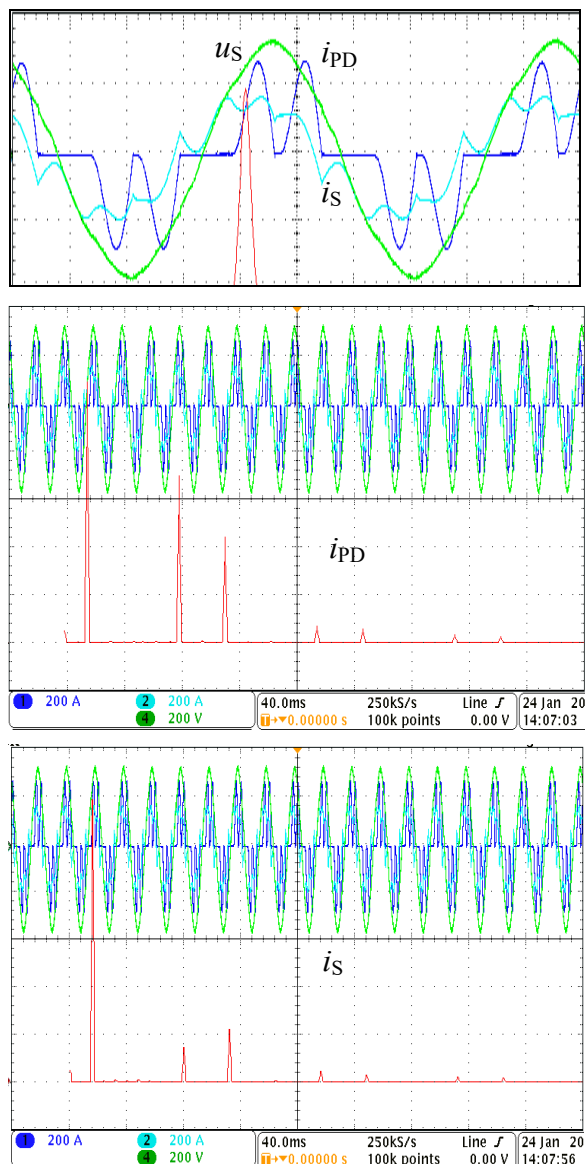


Rys. 5. Badanie dławika sieciowego w prostowniku diodowym

#### 4. Wybrane wyniki badań na stanowisku

Po zainstalowaniu stanowiska w miejscu docelowym przeprowadzono testy pozwalające na poprawną weryfikację jego pracy. Na rys. 5 pokazano wyniki dla etapu uruchamiania stanowiska, przy zasilaniu napięciem 400 V dla filtrów w postaci dławików sieciowych (tryb badania filtru dla prostownika diodowego). W tym przypadku transformator  $Tr2$  włączony jest między sieć i przekształtnik tranzystorowy, obniżając jego napięcie wejściowe. Takie podłączenie transformatora nie zwiększa impedancji w punkcie przyłączenia badanego filtru. Filtr sieciowy dla prostownika diodowego pracuje tu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (prąd  $i_{PD}$ ), a przekształtnik tranzystorowy za-

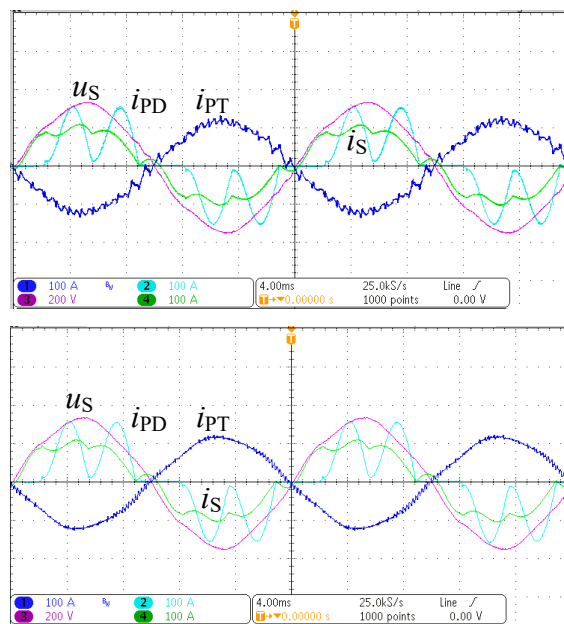
pewnia zwrot energii do sieci przy współczynniku mocy bliskim jedności (prąd  $i_{PT}$ ).



Rys. 6. Badanie skuteczności tłumienia filtra sieciowego do redukcji harmonicznych w prostowniku diodowym

Większa wartość prądu przekształtnika tranzystorowego w stosunku do diodowego wynika z obniżającej napięcie przekładni transformatora. Dzięki pracy ze zwrotem energii do sieci, prąd w punkcie przyłączenia do sieci  $i_S$  jest związany z pobieraniem mocy czynnej na pokrycie strat mocy, a jego wartości chwilowe wynikają z różnicy między prądami obu przekształtników (z uwzględnieniem przekładni transformatora). Prąd ten można zredukować za pomocą sterowania (eliminacja moc biernej i harmonicznych w przekształtniku) lub poprzez zastosowanie dodatkowych filtrów pasywnych.

Na rys.6 pokazano u góry przebiegi napięć i prądów podczas testów filtra sieciowego dla prostownika diodowego, który dzięki złożonej topologii pozwala redukować w sposób znaczący harmoniczne prądu sieci  $i_S$ . Poniżej przedstawiono widmo harmonicznych prądu prostownika  $i_{PD}$  oraz prądu sieci  $i_S$ . Jak można zauważyć filtr skutecznie tłumi harmoniczne (głównie 5-h i 7-h), jednak jego testy na stanowisku pokazały dość dużą czułość na odkształcenia napięcia sieci. Stanowisko testowe pozwoliło na badanie filtra przy mocy około 100 kW, a dodatkowo przekształtnik tranzystorowy wykorzystano do eliminacji mocy biernej pojemnościowej wynikającej z budowy filtra (przesunięcie między podstawową harmoniczną napięcia i prądu sieci), co ograniczyło prąd w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci.



Rys. 7. Badania dławika dla przekształtnika tranzystorowego przy częstotliwości pracy 1,15 kHz i 4,65 kHz

Na rys. 7 pokazano badania stanowiska przy różnych częstotliwościach przełączeń zaworów w przekształtniku tranzystorowym. Po stronie prostownika diodowego zainstalowany był filtr jak na rys. 6. Przebiegi prądu przekształtnika tranzystorowego, w zależności od zastosowanej częstotliwości przełączeń, charakteryzują się różnymi tętnieniami prądu oraz różnymi stratami mocy. Niewielkie odkształcenia prądu przekształtnika tranzystorowego wynikają z odkształceń napięcia sieci. Zastosowany w stanowisku zakres regulacji częstotliwości od 1,15 kHz do 4,65 kHz pozwala na badanie fil-

trów przekształtnikowych typu LC i LCL oraz badanie skuteczności ich tłumienia i analizy problemów związanych z rezonansami przy różnych częstotliwościach pracy.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono budowę i właściwości stanowiska do badania filtrów sieciowych stosowanych w prostownikach diodowych i przekształtnikach tranzystorowych. Omówiono rolę wybranych elementów stanowiska oraz potrzebę zastosowania elementów dodatkowych, takich jak filtry pasywne harmonicznych. Omówiono funkcję sterownika PLC w stanowisku oraz przedstawiono aplikację HMI przygotowaną do sterowania i parametryzacji elementów stanowiska. Zaprezentowane wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają skuteczność działania stanowiska w badaniu obu rodzajów filtrów, potwierdzają także możliwość testów termicznych filtrów w warunkach zbliżonych do znamionowych oraz umożliwiają badanie skuteczności tłumienia harmonicznych.

## 6. Literatura

- [1]. PN-EN 61000 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A), część 3-12: Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym  $> 16$  A i  $\leq 75$  A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia.
- [2]. Czornik J., Łukiewski M.: Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 106, 2015.
- [3]. Szynowski J., Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M.: Reduction of power losses in the tape-wound FeNiCuNbSiB nanocrystal line cores using interlaminar insulation, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, Iss. 4, Apr 2014.
- [4]. Biskup T., Kołodziej H., Michalak J.: Stanowisko do badania dławików dla napędów, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 119, 2018.
- [5]. Biskup T., Kołodziej H., Michalak J., Bodora A.: Stanowisko do badania filtrów dla napędów prądu przemiennego, *Napędy i Sterowanie*, Nr 3/2019,

## Autorzy

dr inż. Tomasz Biskup, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: t.biskup@enel-pc.pl  
dr inż. Henryk Kołodziej, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice

e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl  
dr inż. Aleksander Bodora, Politechnika Śląska,  
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: aleksander.bodora@polsl.pl  
dr inż. Jarosław Michalak, Politechnika Śląska,  
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl

## Informacje dodatkowe

Artykuł prezentuje wyniki związane z realizowanym projektem współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój nr POIR.04.01.02-00-0001/16, pt. *Innowacyjne i energooszczędne nanokrystaliczne dławiki filtrów dla poprawy jakości energii elektrycznej i ograniczenia negatywnego wpływu energetyki na środowisko.*



Unia Europejska  
Europejski Fundusz  
Rozwoju Regionalnego

