

Badania emisji zaburzeń przewodzonych przez programowalne źródło napięcia zmiennego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania emisji zaburzeń przewodzonych przez programowalne źródło napięcia zmiennego, które ma zostać zastosowane do zasilania układu pomiarowego przeznaczonego do sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji prądów i napięć odkształconych. Badania EMC należy wykonać, aby zweryfikować, czy źródło nie będzie wprowadzało zakłóceń w pracy układu pomiarowego.

Abstract. The article presents the results of the study of emission of disturbances by the programmable AC voltage source, which is to be used to supply a measuring system designed to test the accuracy of inductive current and voltage transformers during transformation of distorted currents and voltages. EMC tests should be carried out to verify that the source will not cause interferences in operation of the measuring system. (**Research on the emission of disturbances by a programmable AC voltage source**)

Słowa kluczowe: programowalne źródło napięcia zmiennego, zaburzenia przewodzone, jakość energii, źródło napięcia.

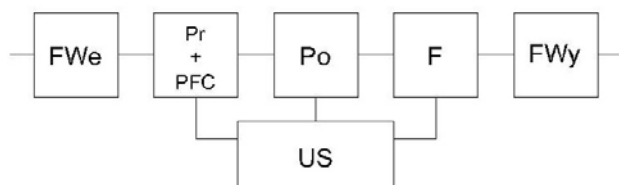
Keywords: programmable AC power supply, conducted disturbances, power quality, voltage source.

Wstęp

Przekładniki napięciowe i prądowe są powszechnie stosowane w układach pomiarowych systemu elektroenergetycznego do transformacji prądów i napięć do wartości odpowiednich dla urządzeń pomiarowych i zabezpieczeniowych. Ciągły wzrost liczby odbiorników nieliniowych i odnawialnych źródeł energii powoduje odkształcenie prądów i napięć w sieci elektroenergetycznej. Obecnie nie ma norm stawiających wymagania co do dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych w takich warunkach. Zasadne jest zatem opracowanie odpowiedniej metodyki badań i układu pomiarowego [1]. Wymaga to przede wszystkim zapewnienia odpowiedniego zasilania. Z dostępnych na rynku najodpowiedniejsze wydają się być programowalne źródła napięć zmiennych. Należy jednak wykonać badania EMC źródła, aby zweryfikować, czy nie będzie powodowało zakłócenia w pracy układu pomiarowego.

Obiekt badań

Programowalne źródła napięć zmiennych są konstruowane w dwóch rodzajach: liniowych i falownikowych. Kluczowym elementem budowy źródeł liniowych jest wzmacniacz mocy, którego zadaniem jest wzmocnienie niewielkiego sygnału pochodzącego z wewnętrznego generatora arbitralnego. Aby zapewnić nieodkształcone napięcie wyjściowe źródła należy zastosować wzmacniacz klasy A lub AB. Drugie z dostępnych na rynku rozwiązań opiera się na metodzie PWM. Urządzenie tego rodzaju było obiektem przeprowadzonych badań. Schemat blokowy takiego źródła przedstawiono na rysunku 1.



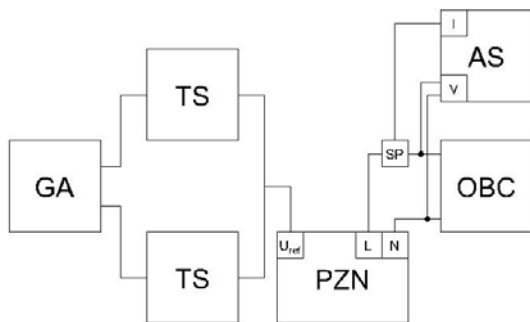
Rys. 1. Schemat blokowy falownikowego źródła programowalnego.

Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia:

FWe – filtr wejściowy, Pr – człon prostowniczy, PFC – człon do poprawy współczynnika mocy, Po – człon pośredni, F – człon z falownikiem sterowanym PWM, FWy – filtr wyjściowy, US – układ sterujący.

Źródło falownikowe składa się z filtra wejściowego EMI wysokich częstotliwości, członu prostowniczego, pośredniego, falownika oraz z filtra wyjściowego. Filtr wejściowy ma za zadanie wyeliminowanie zakłóceń wysokoczęstotliwościowych spowodowanych pracą kluczy tranzystorowych. W najwcześniejszych rozwiązaniach jego funkcję spełniał jedno- lub trójfazowy transformator, aktualnie coraz częściej stosowane są filtry pasywne. Zadaniem członów prostowniczego oraz pośredniego jest dostarczenie do falownika napięcia stałego o odpowiedniej wartości. W zależności od konstrukcji, prostownik może być sterowalny (tyrystorowy) lub niesterowalny (diodowy). Człon prostownikowy może być także wyposażony w aktywny układ poprawy współczynnika mocy (PFC) odpowiadający za utrzymanie współczynnika mocy na poziomie bliskim jedności. Różne rozwiązań konstrukcyjne takiego członu zostały opisane w literaturze [2-4]. Ze względu na topologię źródła, najprostszym do zastosowania układem PFC jest układ kaskadowy, czyli taki, w którym z sieci ładuje się kondensator, z którego pobierana jest energia do układu prostowniczego i falownika [2]. Skuteczność układu PFC zależy od jego konstrukcji. Najkorzystniejsze wyniki osiągają te układy, w których w żadnym momencie pracy nie ma bezpośredniego połączenia sieci zasilającej z obciążeniem przyłączonym do wyjścia źródła [3]. Niezależnie od konstrukcji napięcie na wyjściu prostownika jest pulsujące. Za jego stabilizację odpowiada człon pośredni. Zwykle jest to filtr pojemnościowy, pozostawiający jedynie składową stałą napięcia. Dodatkowo, stanowi on magazyn energii dla udarowych zmian napięcia. W przypadku układów z niesterowalnym członem prostowniczym układ pośredni wyposażony jest w tzw. chopper umożliwiający regulację poziomu napięcia na szynie DC. Człon falownikowy jest natomiast odpowiedzialny za wytworzenieżądanego sygnału. Ze względu na wymagania stawiane programowalnym źródłom AC, tranzystory muszą zarówno być w stanie przekazać wymaganą moc do obciążenia jak i posiadać wysoką częstotliwość kluczenia. Ostatnim elementem toru głównego źródła jest filtr wyjściowy, wygładzający napięcie z falownika. We wcześniejszych rozwiązaniach, podobnie jak w przypadku filtra wejściowego, jego rolę spełniał transformator. Obecnie, ze względu na znaczne rozmiary i koszty wykonania jest on zastępowany przez filtr dolnoprzepustowy. Źródła programowalne, poza wytwarzaniem napięcia sinusoidalnego o różnej częstotliwości, posiadają często zapisane w oprogramowaniu

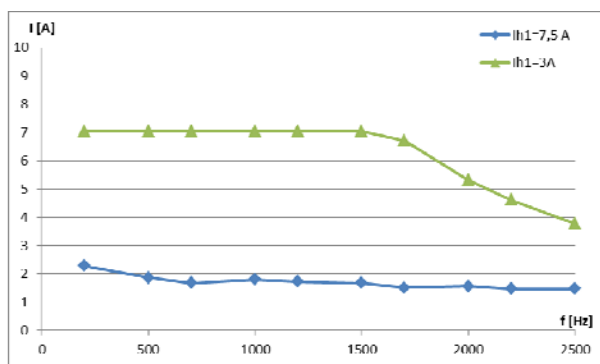
owaniu sterującym funkcje umożliwiające generację napięć odkształconych symulujących zaburzenia analogiczne do występujących w sieci elektroenergetycznej. Źródło programowalne, aby mogło zostać zastosowane do zasilania układów pomiarowych do sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników podczas transformacji sygnałów odkształconych musi posiadać odpowiednią szerokość pasma częstotliwościowego i dawać możliwość zasilania transformatorów podnoszących napięcie i wieloprądowych. W celu wyznaczenia częstotliwościowego pasma pracy źródła i oceny poziomu zaburzeń występujących w napięciu i prądzie wyjściowym zastosowano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia częstotliwościowego pasma pracy źródła programowalnego.

Na rysunku 2 zastosowano następujące oznaczenia: PZN – programowalne źródło napięcia, GA – generator arbitralny, OBC – obciążenie, TS – transformator separacyjny, SP – sondy prądowe, AS – analizator sieci.

Badane źródło (PZN) pracuje jako wzmacniacz sygnału pochodzącego z dwukanałowego generatora arbitralnego (AG). Układ transformatorów separacyjnych (TS1, TS2) zapewnia poprawne działanie wejścia referencyjnego badanego źródła. Na wyjście źródła dołączono obciążenie (OBC) w postaci dławika o regulowanej indukcyjności. Pomiarów szerokości pasma źródła dokonano przy pomocy analizatora zawartości harmonicznym w prądzie i napięciu (AS) umożliwiającego pomiar zawartości wyższych harmonicznym do 50 rzędu. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla obciążenia o indukcyjności 3,4 mH.



Rys. 3. Częstotliwościowe pasmo pracy źródła programowalnego dla obciążenia o indukcyjności 3,4 mH.

Pomiary były wykonywane dla określonego poziomu prądu składowej podstawowej i maksymalnej możliwej do ustawienia wartości pojedynczej wyższej harmonicznym. Znaczniki o kształcie rombów odnoszą się do maksymalnych zawartości poszczególnych wyższych

harmonicznym przy składowej podstawowej wynoszącej 7,5 A, a znacznikami trójkątnymi oznaczono wartości pomierzone przy składowej podstawowej 3 A. W przypadku składowej podstawowej prądu bliskiej wartości znamionowej, pasmo częstotliwościowe źródła wynikało z maksymalnej dopuszczalnej wartości prądu. Po obniżeniu wartości składowej podstawowej prądu do 3 A dla harmonicznym do częstotliwości 1500 Hz szerokość pasma wynikała także z maksymalnej dopuszczalnej wartości prądu, natomiast powyżej 1500 Hz pasmo zostało ograniczone przez maksymalną prędkość zmiany napięcia na kluczach półprzewodnikowych źródła. Podczas wszystkich prób wartość zaburzeń przewodzonych w napięciu wyjściowym źródła nie przekraczała 1%.

Jakość energii elektrycznej

Jakością energii elektrycznej nazywa się zbiór wielkości opisujących ciągłość zasilania i charakteryzujących napięcie. Do parametrów określających jakość energii elektrycznej według normy EN 50160 należą [5]:

- częstotliwość napięcia w sieci zasilającej,
- wartość napięcia,
- odchylenia napięcia (wolne zmiany napięcia),
- wahania napięcia (szybkie zmiany napięcia),
- zapady napięcia,
- zaniki napięcia,
- asymetria napięcia,
- zawartość harmonicznym napięcia.

Odchyleniami napięcia nazwano wszelkie długotrwałe zwiększenia lub zmniejszenia wartości skutecznej napięcia zasilającego. Zwykle powodują je zmiany w obciążeniu sieci. Mianem wahań napięcia określono zmiany wartości skutecznej napięcia utrzymujące się w skończonym czasie. Do oceny ich wartości służy wskaźnik migotania światła. Zapady napięcia to zaburzenia polegające na zmniejszeniu wartości skutecznej napięcia do poziomu pomiędzy 90% a 1% napięcia znamionowego sieci. Czas trwania zapadu wynosi od 10 ms do 1 min. Zanik napięcia występuje, gdy wartość skuteczna napięcia sieciowego spadnie poniżej 1% wartości znamionowej. Asymetrią nazwano stan sieci trójfazowej, w którym wartości napięć fazowych poszczególnych faz są różne lub kąty pomiędzy kolejnymi fazami nie są równe. Harmoniczną nazwano składową prądu lub napięcia o częstotliwości będącej całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Pozostałe składowe, będące niecałkowitą wielokrotnością składowej podstawowej nazwano interharmonicznymi. Występowanie interharmonicznym jest spowodowane szybkimi zmianami prądów w urządzeniach, co generuje składowe w pasmach bocznych częstotliwości znamionowej oraz asynchronicznym łączeniem elementów półprzewodnikowych. Obecność harmonicznym i interharmonicznym w napięciu sieciowym jest zjawiskiem wysoce niekorzystnym. Powodują one wydzielanie się ciepła na elementach przewodzących, oscylacje niskoczęstotliwościowe systemów mechanicznym, zaburzenia pracy elektroniki, interferencje z sygnałami sterującymi i telekomunikacyjnymi, a także nasycenie rdzeni przekładników indukcyjnych. Zjawiska te mogą być spotęgowane przez wystąpienie rezonansu. Metody pomiaru poszczególnych współczynników jakościowych energii elektrycznej zestawiono w normie PN-EN 61000-4-30 [6]. Wyróżniono dwie klasy pomiarów. Klasę A, do której zaliczono m.in. pomiary mające na celu sprawdzenie zgodności z wymogami albo mające posłużyć w rozwiązywaniu sporów, oraz klasę B, w której zebrano pomiary do badań statystycznych, rozwiązywania bieżących problemów oraz innych zastosowań niewymagających znacznej dokładności. Dla pomiarów klasy A norma

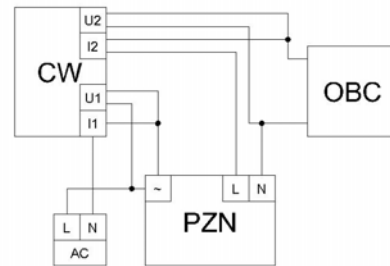
przewiduje 3 długości czasu pomiarów: 3-sekundowy, 10-minutowy oraz 2-godzinny. Podczas pomiarów 3-sekundowych dane mają być zbierane w 15 10-cio okresowych cyklach. Pomiarów 10-cio minutowych także zbierane są w 10-cio okresowych cyklach, z zastrzeżeniem, że start pierwszego cyklu powinien być zawsze zsynchronizowany z początkiem okresu 10-cio minutowego. Pomiarów 2-godzinnych są złożeniem 12-stu pomiarów 10-cio minutowych. Niepewność synchronizacji z zegarem nie może być większa niż 20 ms. Czas trwania pomiarów dla przyrządów klasy B jest dowolny. Pomiar częstotliwości powinien być odczytywany co 10s, jako iloraz ilości pełnych okresów do czasu trwania pomiaru. Niepewność pomiaru częstotliwości nie może być większa niż 0,01 Hz. Wartość napięcia została określona jako wartość skuteczna zmierzona podczas 10-ciu kolejnych okresów, a jej niepewność pomiaru nie może przekroczyć 0,1% napięcia znamionowego. Norma ta nie zawiera wytycznych odnośnie pomiaru harmonicznych, interharmonicznych, ani współczynnika migotania światła.

Zaburzenia przewodzone

Zaburzeniem nazwano każdy sygnał niepożądany, powodujący nieprawidłową pracę urządzenia, układu czy sieci elektroenergetycznej. Zaburzenia podzielono na dwa rodzaje: promieniowane i przewodzone [7]. Zaburzenia przewodzone dzielą się na zaburzenia symetryczne (różnicowe - DM) oraz asymetryczne (wspólne - CM). Do zaburzeń symetrycznych zaliczono sygnały występujące pomiędzy dwoma przewodami, zaburzenie rozchodzi się w nich w różnych kierunkach. Są one spowodowane m.in. nieliniowością procesu przekształcania energii elektrycznej oraz przełączaniem kluczy półprzewodnikowych. W przypadku zaburzeń asymetrycznych ich propagacja następuje w kierunku potencjału ziemi. Są one związane ze sprzężeniami pojemnościowymi oraz impedancyjnymi. Ze względu na kierunek rozchodzenia, zaburzenia te mogą przenosić się poprzez wspólną impedancję uziemienia. Nie ma możliwości całkowitej eliminacji zaburzeń przewodzonych, można jedynie ograniczać ich wartości. Odpowiedzialność za poziom zaburzeń w sieci elektroenergetycznej leży zarówno po stronie dostawców energii, jak i po stronie odbiorców. Dopuszczalne poziomy zaburzeń jakie mogą wystąpić w sieci określono w normach PN-EN 61000-2-2 dla publicznych sieci zasilających i PN-EN 61000-2-4 dla sieci przemysłowych [8-9]. Normy PN-EN 61000-3-2 i PN-EN 61000-3-12 określają natomiast dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu poszczególnych urządzeń, o poborach prądu odpowiednio do 16 A oraz do 75 A [10-11]. Norma PN-EN 61000-3-2 dzieli urządzenia na cztery kategorie: A – obejmującą wszystkie urządzenia nieujęte w pozostałych klasach, B – narzędzia przenośne i nieprofesjonalny sprzęt spawalniczy, C – sprzęt oświetleniowy oraz D – komputery, monitory i telewizory o mocy nieprzekraczającej 600 W. W normie określono także, że wartość harmonicznej należy określić jako średnią z pomiaru trwającego 1,5 s. Wymagania odnośnie urządzeń pomiarowych dedykowanych do pomiarów zaburzeń zestawiono w normie PN-EN 61000-4-7 [12]. Do pomiarów zaleca się urządzenia oparte o dyskretną transformację Fouriera. Norma ta zawiera także wymagania odnośnie dokładności urządzeń pomiarowych. Dokonano w niej podziału sprzętu na dwie klasy, I i II, odpowiadające klasom A i B z normy PN-EN 61000-4-30 [6]. Sposoby pomiaru opisano w normie PN-EN 61000-4-13, dla zaburzeń o częstotliwości do 9 kHz, oraz w normie PN-EN 61000-4-6, dla zaburzeń o częstotliwości powyżej 9 kHz [7] [13].

Wyniki badań

Układ pomiarowy zastosowano do badania emisji zaburzeń przewodzonych przez programowalne źródło napięcia zmiennego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Układ pomiarowy do badania emisji zakłóceń ze źródła PZC

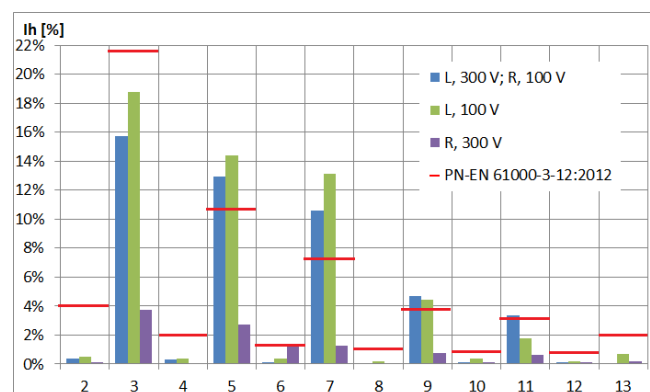
Na rysunku 4 zastosowano następujące oznaczenia: PZN – programowalne źródło napięcia, CW – cyfrowy watomierz, OBC – obciążenie, AC – zasilanie.

W kanale 1 cyfrowego watomierza (CW) dokonano pomiaru parametrów napięcia zasilania badanego urządzenia (PZN), a w kanale 2 prądu i napięcia wyjściowego. Pierwszym etapem badań było sprawdzenie wpływu charakteru zastosowanego obciążenia na emisję zakłóceń ze źródła. Dokonano pomiarów dla obciążenia indukcyjnego i rezystancyjnego przy napięciu wyjściowym 300 V i 100 V. W tabeli 1 zestawiono wyznaczone wartości współczynnika zawartości wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym badane źródło napięcia (THDi) dla badanych przypadków, a procentowe wartości poszczególnych wyższych harmonicznych przedstawiono na rysunku 5.

Tab. 1. Wyznaczone wartości współczynnika zawartości wyższych harmonicznych w prądzie zasilającym badane źródło napięcia.

	L, 300 V	L, 100V	R, 300 V	R, 100 V
THDi	23,99%	27,86%	4,96%	23,99%

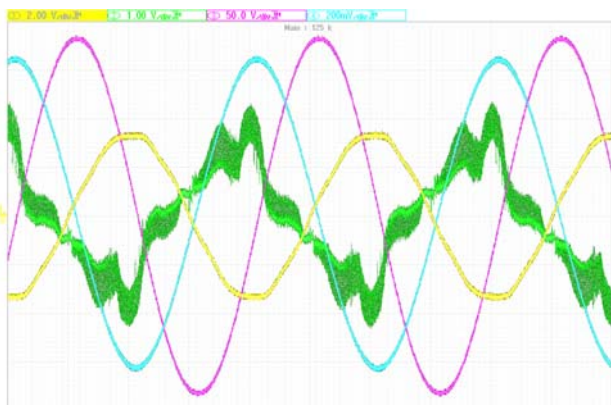
Największą zawartość wyższych harmonicznych uzyskano dla przypadku obciążenia indukcyjnego i napięcia wyjściowego 100 V, natomiast najniższą dla obciążenia rezystancyjnego i napięcia wyjściowego 300 V. Dla przypadków obciążenia indukcyjnego przy 300 V napięcia wyjściowego oraz obciążenia rezystancyjnego przy 100 V napięcia wyjściowego uzyskano taką samą wartość współczynnik THDi.



Rys. 5. Wartości poszczególnych wyższych harmonicznych prądu emitowane przez programowalne źródła napięcia.

Różnice w procentowych wartościach poszczególnych wyższych harmonicznych prądu emitowanych przez

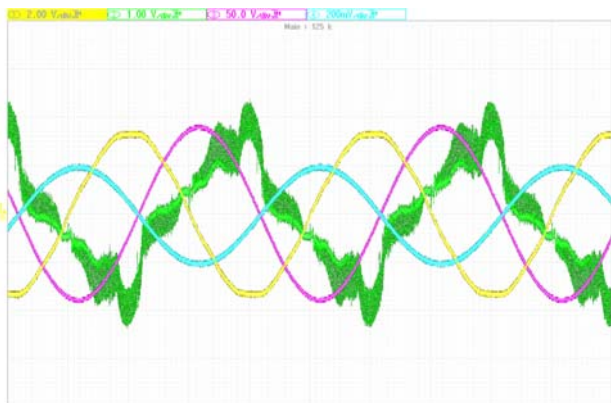
programowalne źródła napięcia dla poszczególnych badanych przypadków wynikają z wartości skutecznej prądu pobieranego przez urządzenie. W przypadku, gdy wartość skuteczna pobieranego prądu przez źródło wynosi 1 A, zarówno dla obciążenia rezystancyjnego, jak i reaktancji indukcyjnej wartości poszczególnych harmonicznym prądu emitowane przez źródło są takie same (przypadek: L 300 V i R 100 V). W przypadku, obciążenia rezystancyjnego przy maksymalnym napięciu wyjściowym źródła równym 300 V i maksymalnym prądzie wyjściowym o wartości skutecznej 6,5 A prąd pobierany z sieci przez źródło ma najwyższą wartości i dlatego procentowe wartości zarejestrowanych wyższych harmonicznym prądu są najmniejsze (przypadek: R 300 V). Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono oscylogramy przebiegów prądów i napięć po stronie zasilania źródła i na jego wyjściu przy obciążeniu indukcyjnym i rezystancyjnym.



Rys. 6. Oscylogramy prądów i napięć na wyjściu i po stronie zasilania źródła przy obciążeniu indukcyjnym.

Na wszystkich oscylogramach zastosowano następujące kolory do wykreślenia przebiegów prądów i napięć:

żółty - napięcie zasilania (1 V na wykresie oznacza wartość skuteczną napięcia 100 V), zielony - prąd zasilania (1 V na wykresie oznacza wartość skuteczną prądu 1 A), różowy - napięcie wyjściowe (1 V na wykresie oznacza wartość skuteczną napięcia 1 V), niebieski - prąd wyjściowy (1 V na wykresie oznacza wartość skuteczną prądu 10 A).



Rys. 7. Oscylogramy prądów i napięć na wyjściu i po stronie zasilania źródła przy obciążeniu rezystancyjnym.

Porównując oscylogramy przedstawione na rysunkach 6 i 7 można zauważyć, że przebieg prądu zasilania urządzenia jest identyczny dla obu przypadków, różnią się natomiast wartości prądów i napięć wyjściowych. Prąd pobierany przez urządzenie w przypadku obciążenia rezystancyjnego przy maksymalnym napięciu wyjściowym

źródła równym 300 V i maksymalnym prądzie wyjściowym o wartości skutecznej 6,5 A jest nieodkształcony.

Wnioski

Różnice w procentowych wartościach poszczególnych wyższych harmonicznym prądu emitowanych przez programowalne źródła napięcia dla poszczególnych badanych przypadków wynikają z wartości skutecznej prądu pobieranego przez urządzenie. Wynika to z impulsowej pracy prostownika w badanym programowalnym źródle napięcia. Wraz ze wzrostem składowej czynnej prądu wyjściowego wydłużał się czas trwania impulsu ładowania kondensatora, a odkształcenie pobieranego prądu maleje. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że w przypadku wspólnego zasilania źródło może powodować zakłócenia w pracy układu pomiarowego do sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji prądów i napięć odkształconych, ponieważ przekroczone są dopuszczalne wartości emisji harmonicznym prądu 5,7 i 9 rzędu.

Autorzy: dr hab. inż. Michał Kaczmarek, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90 - 924 Łódź, michal.kaczmarek@p.lodz.pl; mgr inż. Piotr Kaczmarek, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 18/22, 90 - 924 Łódź, piotr.kaczmarek@edu.p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Kaczmarek M., Nowicz R.: Propozycje zaleceń normalizacyjnych do badań dokładności przekładników dla przebiegów odkształconych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2a/2013, s. 72-74.
- [2] Chi K. Tse, Martin H. L. Chow, Martin K.H. Cheung, A family of PFC Voltage Regulator Configurations with Reduced Redundant Power Processing, *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 16, 2001, s. 794-802.
- [3] Chi K. Tse, Zero-Order Switching Networks and Their Applications to Power Factor Correction in Switching Converters, *IEEE Transactions on circuits and systems*, vol. 44, 1997, s. 667-675.
- [4] Gąsiorowski A., Posytek Z., Wróbel M., Nowicz R.: Aktywny korektor współczynnika mocy PFC w układach jednofazowych z prostownikiem dwupołkowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1/2017, s. 149-152.
- [5] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [6] PN-EN 61000-4-30:2015, Metody badań i pomiarów -- Metody pomiaru jakości energii.
- [7] PN-EN 61000-4-6:2014, Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej
- [8] PN-EN 61000-2-2:2003, Poziomy kompatybilności zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości i sygnałów przesyłanych w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia.
- [9] PN-EN 61000-2-4:2003, Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych
- [10] PN-EN 61000-3-2:2014, Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznym prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A).
- [11] PN-EN 61000-3-12:2012, Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznym prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym > 16 A i $<$ lub $= 75$ A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia
- [12] PN-EN 6100-4-7:2007, Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznym i interharmonicznym oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [13] PN-EN 61000-4-13:2007, Harmoniczne i interharmoniczne wraz z sygnałami sieciowymi w przyłączy zasilającym prądu przemienne -- Badania odporności na zaburzenia małej częstotliwości.