

doi:10.15199/48.2024.04.09

Kompatybilność elektromagnetyczna źródeł zasilania umożliwiających generację napięcia zmiennego w szerokim zakresie częstotliwości

Streszczenie Celem pracy jest określenie warunków badań szerokopasmowych źródeł zasilania o różnej budowie i zasadzie działania pozwalających na wyznaczenie maksymalnych poziomów emisji zaburzeń elektromagnetycznych, które występują podczas ich użytkowania. Badaniom w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) zostały poddane opracowany system zasilania składający się ze wzmacniacza audio i generatora arbitralnego oraz seryjnie produkowane programowalne źródło napięcia zmiennego firmy Chroma model 61504.

Abstract. The aim of this paper is to identify test conditions for wideband power sources of various designs and operating principles to determine the maximum emission levels of electromagnetic disturbance that occur during their utilization. Electromagnetic compatibility (EMC) tests were performed on the developed power supply system composed of an audio amplifier and an arbitrary generator, as well as a manufactured programmable AC power source Chroma model 61504. (Electromagnetic compatibility of power supplies providing generation of AC voltage over a wide frequency range).

Słowa kluczowe: EMC, źródło zasilania, zaburzenia przewodzone, zaburzenia promieniowane, generacja napięcia zmiennego.

Keywords: EMC, power source, conducted emission, radiated emission, generation of AC voltage.

Wstęp

Szerokopasmowe źródła zasilania mają wiele zastosowań, jednakże jednym z najbardziej wymagających jest zasilanie układów probierczych do badania dokładności indukcyjnych przekładników [1-10]. Jest to spowodowane tym, że zgodnie z wymaganiami kompatybilności elektromagnetycznej (*ang.* EMC - *ElectroMagnetic Compatibility*) dla tych urządzeń nie mogą one oddziaływać na pracę czułego układu pomiarowego, przy jednoczesnym zachowaniu zdolności do generacji dużych mocy. W tym przypadku te pożądane właściwości wynikają z nieliniowości krzywej magnesowania rdzenia indukcyjnych przekładników oraz konieczności sprawdzania ich dokładności w warunkach pracy znamionowej [11-15]. Ponadto, podczas badań indukcyjnych przekładników napięciowych i dzielników wzrasta ekspozycja na pole elektromagnetyczne [5,7,8,16-20]. W przypadku zasilania układu probierczego przekładników prądowych wymagana jest wysoka odporność na oddziaływanie pola magnetycznego pochodzącego od toru wieloprądowego [5,6,21-23]. Wytyczne dotyczące metod i układów zasilających oraz systemów pomiarowych do sprawdzania dokładności przekładników prądowych i napięciowych pracujących w warunkach odkształconego prądu lub napięcia pierwotnego są wciąż opracowywane [3,5,22]. Zapotrzebowanie na badania przekładników w rozszerzonym zakresie częstotliwości pracy wynika z niskiej jakości energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej [7,8,17]. Zgodnie z dyrektywą EU nr 2014/30/EU urządzenia elektryczne powinny spełniać wymagania kompatybilności elektromagnetycznej [24]. Ma to na celu zapewnienie, że urządzenia elektryczne i elektroniczne nie będą generowały i będą odporne na zaburzenia elektromagnetyczne. Szerokopasmowe źródła zasilania do zastosowań laboratoryjnych podlegają normie PN-EN IEC 61326-1, w której zawarto wymagania dotyczące odporności i dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń elektromagnetycznych promieniowanych i przewodzonych (zgodne z normą EN 55011) [25,26]. Jednak, norma ta nie określa precyzyjnych warunków pracy, w których mają zostać przeprowadzone badania EMC. Określa jedynie, że należy je wykonać w sposób zapewniający wyznaczenie najwyższych występujących poziomów zaburzeń

przewodzonych i promieniowanych. Należy zatem na podstawie wykonanych badań i ich analiz określić, w których warunkach pracy należy przeprowadzić pomiary.

W artykule [27] przedstawiono wdrożoną koncepcję trójfazowego źródła programowalnego zapewniającego stabilne napięcie o regulowanej amplitudzie w szerokim pasmie częstotliwości. Urządzenie jest w stanie generować przebiegi zawierające kilka wyższych harmonicznnych. W publikacji [28] przedstawiono możliwość generacji niesinusoidalnych przebiegów przez kalibrator. Sprzężenie zwrotne zapewnia kontrolę amplitudy i kąta fazowego wyższych harmonicznnych napięcia zapewniając precyzyjne odwzorowanie generowanego przebiegu. Celem tych badań jest określenie warunków pracy szerokopasmowych źródeł zasilania o różnej konstrukcji i zasadzie działania umożliwiających wyznaczenie maksymalnych występujących podczas ich eksploatacji poziomów emisji zaburzeń elektromagnetycznych. Badaniom w zakresie EMC poddano opracowany w oparciu o wzmacniacz audio i generator arbitralny system zasilania. Do analizy porównawczej wykonane zostały pomiary EMC seryjnie produkowanego programowalnego źródła napięcia zmiennego Chroma 61504. W celu wykonania badań emisji promieniowanej i przewodzonej dla najgorszego przypadku, w którym generowane zaburzenia elektromagnetyczne przez urządzenia przyjmują najwyższe wartości, pomiary przeprowadzono dla różnych wartości impedancji obciążenia i jego charakteru oraz parametrów napięcia i prądu wyjściowego.

Obiekty badań

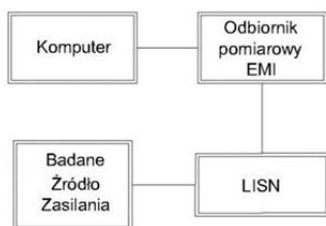
Badania EMC przeprowadzono dla dwóch źródeł zasilania. Urządzenie A to oparte o falownik PWM programowalne źródło napięcia zmiennego Chroma 61504, a urządzenie B to wzmacniacz mocy audio sterowany za pomocą generatora arbitralnego. Źródło oparte o falownik PWM składa się z czterech głównych elementów: stopnia wejściowego z aktywną korekcją współczynnika mocy i stopniowanym napięciu wyjściowym, szyny prądu stałego, obwód kontrolnego PWM i falownika wyjściowego. Poprawa współczynnika mocy jest uzyskiwana poprzez sterowanie prądem cewki i kondensatora wejściowego poprzez klucz MOSFET w taki sposób, aby prąd i napięcie zasilające

urządzenie były ze sobą w fazie. Falownik mocy działający na zasadzie PWM zbudowany jest z co najmniej dwóch tranzystorów, z których jeden odpowiada za generację górnej części przebiegu a drugi dolnej. Napięcie wyjściowe składa się z szeregu prostokątów o różnej szerokości [29,30]. Badania wykonano na źródle o mocy znamionowej 2 kVA. Źródło może pracować w dwóch zakresach napięciowych: 0 - 150 V oraz 0 - 300 V, wartość skuteczna maksymalnego prądu wyjściowego wynosi odpowiednio: 16 A i 8 A. Maksymalna częstotliwość podstawowa generowanego wewnątrz napięcia wyjściowa źródła to 1 kHz. Zakres generowanych harmonicznych ograniczony jest do częstotliwości 2400 Hz. Badany wzmacniacz audio należy do klasy H. Tranzystory końcówki mocy pracują w układzie przeciwobnym. Zakłócenia skrośne są eliminowane poprzez wydłużenie pracy każdego z tranzystorów do ponad połowy cyklu. Wzmacniacze klasy H mają wyższą sprawność od klasy AB poprzez zastosowanie zasilania szyny prądu stałego o stopniowanym napięciu wejściowym. Wzmacniacz posiada dwa kanały, które mogą pracować oddzielnie lub w układzie mostkowym wytwarzając podwojone napięcie wyjściowe. Dzięki zastosowaniu wspólnego sterowania, oba kanały wzmacniają taki sam sygnał, przy czym jeden z nich jest odwrócony w fazie. Moc znamionowa badanego wzmacniacza wynosiła 2 kW podczas pracy na obciążenie 2Ω oraz 4 kW podczas pracy w trybie mostkowym na obciążenie 4Ω . Wartość skuteczna napięcia wyjściowego bez obciążenia wynosi 70 V i 140 V, odpowiednio dla pracy pojedynczego kanału i trybu mostkowego. Znamionowa wartość skuteczna prądu wyjściowego niezależnie od trybu pracy urządzenia wynosi 28 A. Zastosowanie wzmacniacza jako programowalnego źródła napięcia zmiennego wymaga sterowania z generatora arbitralnego. Taki system zasilania zapewnia za ¼ ceny dwukrotnie wyższą wyjściową moc czynną. Układy probiercze do sprawdzania dokładności przekładników mają charakter indukcyjny [3,5,7,16,22,23]. W takim przypadku napięcie wyjściowe i moc pozorna są ograniczone do połowy [30,31]. Największą zaletą badanego programowalnego źródła napięcia zmiennego Chroma 61504 jest jego zdolność do autonomicznej pracy. Jednakże, w takim przypadku jego częstotliwościowe pasmo pracy jest ograniczone do 1 kHz.

Badania emisji przewodzonej i promieniowanej

Na badania kompatybilności elektromagnetycznej składają się pomiary zaburzeń przewodzonych zgodnie z normą PN-EN IEC 61326-1 w zakresie częstotliwości 150 kHz – 30 MHz oraz pomiary zaburzeń promieniowanych w zakresie 30 MHz – 1 GHz [25]. Pomiarów zaburzeń przewodzonych dokonano przy pomocy przetwornika SMR 4503, sztucznej sieci LISN NNB-51 oraz komputera z zainstalowanym programem COMPLIANEC-3 w wersji 3.90 (Rysunek 1a).

Pomiary zaburzeń promieniowanych wykonano w komorze GTEM-1000 przy pomocy przetwornika pomiarowego SMR 4503 i komputera z zainstalowanym oprogramowaniem COMPLIANCE-3 w wersji 3.90 (Rysunek 1b).



a



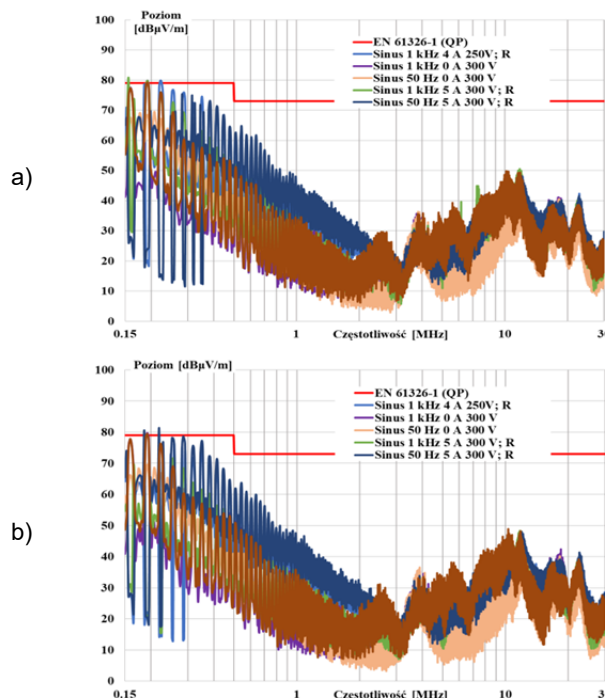
b



Rys.1. Układ do pomiarów zaburzeń a) przewodzonych, b) promieniowanych

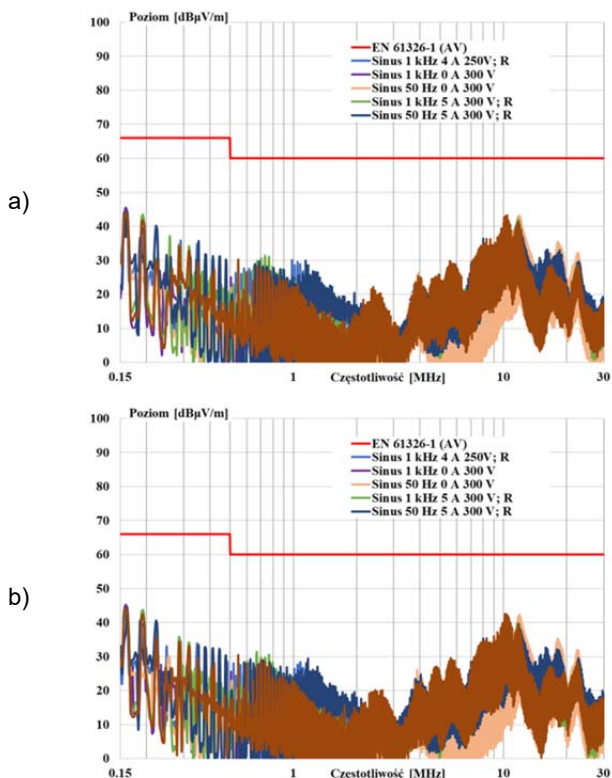
Dla obu badanych źródeł przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu częstotliwości sygnału wyjściowego na wartość emisji zaburzeń przewodzonych. Pomiarów wykonano dla częstotliwości generowanego napięcia wynoszących 50 Hz i 1 kHz oraz różnych wartości wyjściowych prądów i napięć, a także charakteru obciążenia (rezystory i dławiki).

Na rysunku 2 przedstawiono widmo zaburzeń przewodzonych zarejestrowane dla źródła opartego o falownik PWM (urządzenie A). Podczas badań urządzenie generowało wyjściowe napięcie sinusoidalne o częstotliwości 50 Hz i 1 kHz przy różnych wartościach prądów i napięć wyjściowych. Pomiary wykonano detektorem quasi-peak.



Rys.2. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń przewodzonych zarejestrowane dla źródła zasilania z falownikiem PWM (urządzenie A) – zastosowano detektor quasi-peak (QP), zaburzenia w przewodzie a) fazowym L1, b) neutralnym N

Wartości graniczne dla emisji zaburzeń przewodzonych określone w normie PN-EN IEC 61326-1 zostały nieznacznie przekroczone, przy czym ich wartości zawarte są w granicach niepewności pomiarowej aparatury. W tym przypadku, uznaje się, że urządzenie warunkowo spełnia wymagania norm. Ponadto, dla urządzenia A zaobserwowano wpływ częstotliwości generowanego napięcia na ich poziom. Zarówno w stanie jałowym jak i obciążenia (przy wartości skutecznej napięcia wyjściowego 300 V i prądu 5 A) następuje wzrost o 10 dB μ V/m. Może to wynikać z zastosowania stopnia wejściowego wyposażonego w aktywną korekcję współczynnika mocy. Nie stwierdzono wpływu obciążenia na wartość zarejestrowanej emisji zaburzeń przewodzonych przez urządzenie A. Zgodnie z normą EN 61326-1 (odnoszącej się bezpośrednio do normy EN 55011) w celu określenia wymaganego poziomu kompatybilności elektromagnetycznej należy wykonać także pomiar emisji przewodzonej detektorem wartości średniej (Rysunek 3).

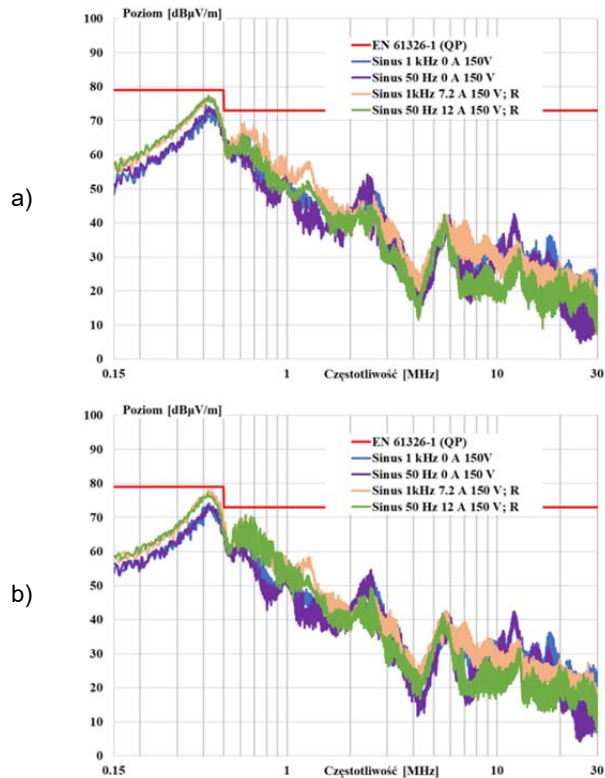


Rys.3. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń przewodzonych zarejestrowane dla źródła zasilania z falownikiem PWM (urządzenie A) – zastosowano detektor wartości średniej (AV), zaburzenia w przewodzie a) fazy L1, b) neutralnym N

W przypadku badania wartości średniej emisji przewodzonej norma definiuje niższe dopuszczalne wartości graniczne emisji. W żadnym z analizowanych przypadków nie nastąpiło przekroczenie dopuszczalnych wartości granicznych określonych zgodnie z normą PN-EN IEC 61326-1. Dodatkowo, sprawdzono jak charakter obciążenia i kształt napięcia wyjściowego badanego źródła wpływają na wartości emisji przewodzonej. Uzyskane wyniki badań wskazują, że obciążenie indukcyjne i zmiana częstotliwości generowanego napięcia oraz wartości skutecznej napięcia i prądu wyjściowego nie powodują zmiany widma zaburzeń. Również w przypadku generacji przebiegów prostokątnych o częstotliwości podstawowej 50 Hz i 1 kHz nie zaobserwowano wpływu tych czynników na emisję zaburzeń przewodzonych. W związku z tym można stwierdzić, że rodzaj obciążenia i kształt oraz

częstotliwość generowanego napięcia nie mają wpływu na poziom emisji zaburzeń przewodzonych.

Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane dla wzmacniacza audio (urządzenie B) widmo częstotliwościowe zaburzeń przewodzonych. Podczas badań urządzenie generowało wyjściowe napięcie sinusoidalne o częstotliwości 50 Hz i 1 kHz przy różnych wartościach prądów i napięć wyjściowych. Pomiar wykonano detektorem quasi-peak.

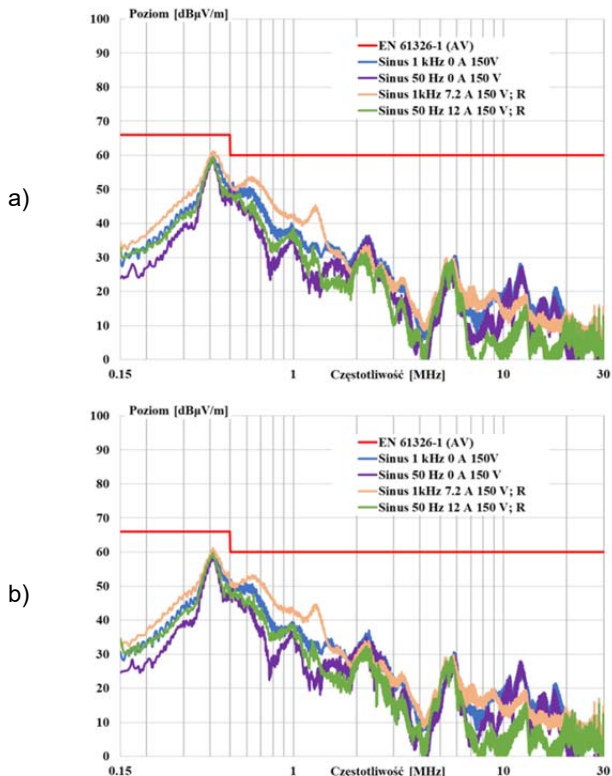


Rys.4. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń przewodzonych przez wzmacniacz audio (urządzenie B) – zastosowano detektor quasi-peak (QP), zaburzenia w przewodzie a) fazy L1, b) neutralnym N

Dla urządzenia B nie zauważono istotnego wpływu częstotliwości generowanego napięcia i wartości skutecznej napięcia i prądu wyjściowego na poziom emisji zaburzeń przewodzonych, z uwagi na brak wpływu tych czynników na charakterystykę pracy układu prostowniczego w badanym zakresie częstotliwości. Wartości graniczne dla emisji zaburzeń przewodzonych określone w normie PN-EN IEC 61326-1 nie zostały przekroczone. Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane zgodnie z normą PN-EN 61326-1 dla wzmacniacza audio (urządzenie B) widmo emisji przewodzonej detektorem wartości średniej przy różnych częstotliwościach generowanego napięcia sinusoidalnego oraz wartościach obciążenia rezystancyjnego.

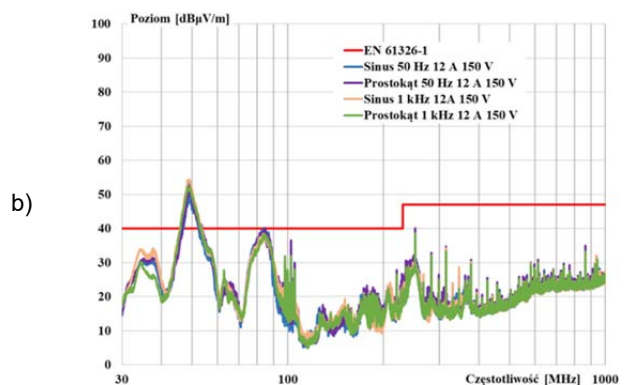
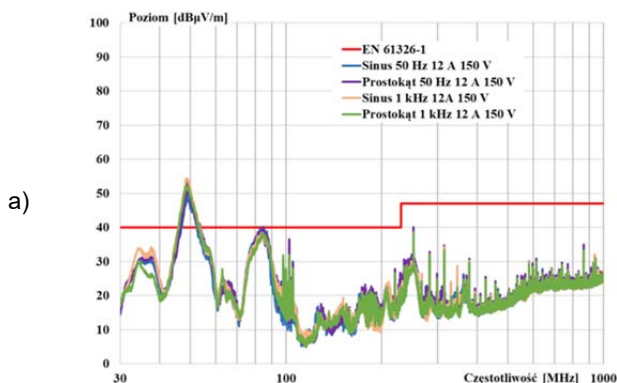
Przeprowadzone pomiary wartości średnich emisji zaburzeń przewodzonych dla urządzenia B potwierdzają brak istotnego wpływu częstotliwości generowanego napięcia i wartości skutecznej napięcia i prądu wyjściowego na ich poziom. Urządzenie jest zgodne z wymaganiami normy PN-EN 61326-1. Dodatkowo sprawdzono wpływ charakteru obciążenia badanego źródła na wartości emisji przewodzonej i kształtu napięcia wyjściowego. W przypadku gdy, do obciążenia źródła zastosowano dławik również nie zaobserwowano wpływu częstotliwości generowanego napięcia i wartości skutecznej napięcia i prądu wyjściowego na ich poziom. W przypadku

przebiegów prostokątnych o częstotliwości podstawowej 50 Hz i 1 kHz również nie zaobserwowano wpływu wymienionych czynników. Ponadto należy stwierdzić, że rodzaj obciążenia i kształt generowanego napięcia nie wpływają na widmo emisji zaburzeń przewodzonych.



Rys.5. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń przewodzonych przez wzmacniacz audio (urządzenie B) – zastosowano detektor wartości średniej (AV), zaburzenia w przewodzie a) fazy L1, b) neutralnym N

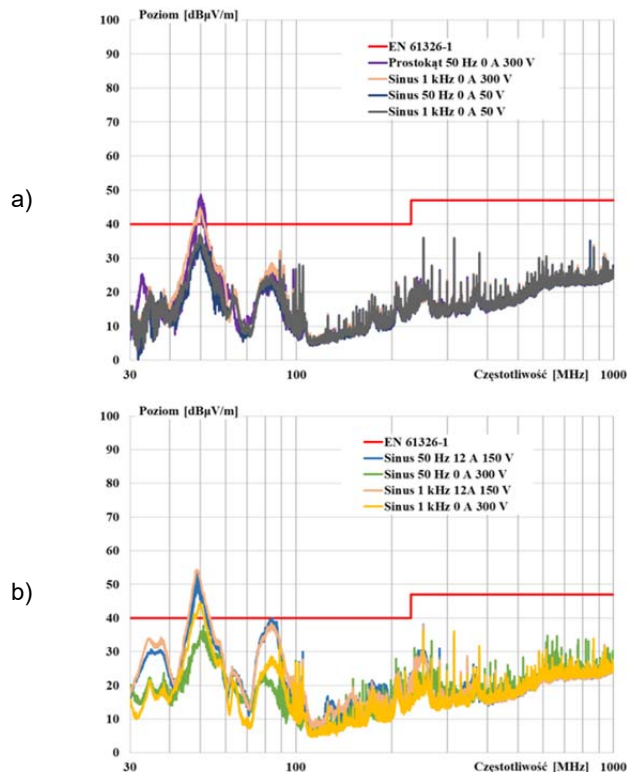
Wartości emisji promieniowanej szerokopasmowych źródeł zasilania zostały wyznaczone dla dwóch częstotliwości generowanego napięcia wyjściowego: 50 Hz i 1000 Hz oraz dla różnych wartości skutecznych napięć i prądów wyjściowych a także, wartości charakteru obciążenia. Na rysunku 6 przedstawiono zarejestrowane dla źródła opartego o falownik PWM (urządzenie A) częstotliwościowe widmo emisji zaburzeń promieniowanych. Pomiary wykonano dla częstotliwości 50 Hz i 1000 Hz generowanego sinusoidalnego i prostokątnego napięcia wyjściowego.



Rys.6. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń promieniowanych przez źródło z falownikiem PWM (urządzenie A) podczas generacji napięć o częstotliwościach: 50 Hz i 1000 Hz dla różnych a) kształtów napięcia wyjściowego, b) rodzajów obciążenia

Nie stwierdzono istotnego wpływu częstotliwości i kształtu generowanego napięcia oraz rodzaju obciążenia na poziom emisji zaburzeń promieniowanych przez urządzenie A. Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń promieniowanych określone w normie PN-EN IEC 61326-1 zostały przekroczone. Prawdopodobne źródło zaburzeń stanowią klucze tranzystorowe falownika PWM. W celu zmniejszenia emisji promieniowanej należy zastosować ferryty nakładane na przewód zasilający urządzenie.

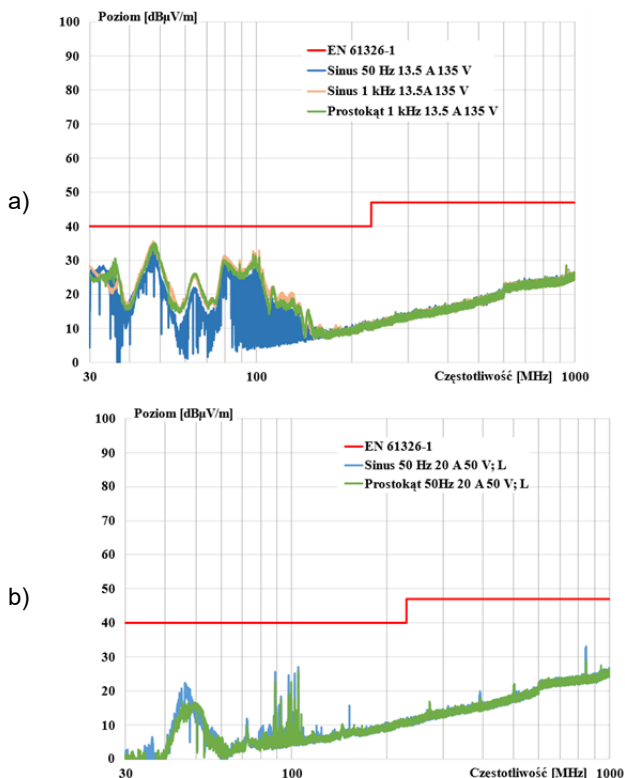
Na rysunku 7 przedstawiono częstotliwościowe widmo emisji zaburzeń promieniowanych dla źródła opartego o falownik PWM. Badania przeprowadzono dla generacji napięcia o częstotliwości 50 Hz i 1 kHz o kształcie sinusoidalnym i prostokątnym.



Rys.7. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń promieniowanych przez źródło z falownikiem PWM (urządzenie A) podczas generacji napięcia o częstotliwości 50 Hz i 1 kHz dla różnych a) kształtów i wartości skutecznych napięcia wyjściowego, b) wartości skutecznych prądów i napięć sinusoidalnych

Zmniejszenie wartości skutecznej napięcia wyjściowego urządzenia A powoduje obniżenie poziomu emisji zaburzeń promieniowanych. Jednakże, kształt generowanego napięcia wyjściowego i jego częstotliwość nie wpływa na wartości zarejestrowanych zaburzeń. Dodatkowe badania wykazały wpływ prądu wyjściowego na wartość emisji przewodzonej.

Na rysunku 8 przedstawiono częstotliwościowe widmo emisji zaburzeń promieniowanych przez wzmacniacz audio. Pomiar wykonano dla częstotliwości 50 Hz i 1000 Hz generowanego sinusoidalnego i prostokątnego napięcia wyjściowego przy ustalonych wartościach skutecznych prądu i napięcia.



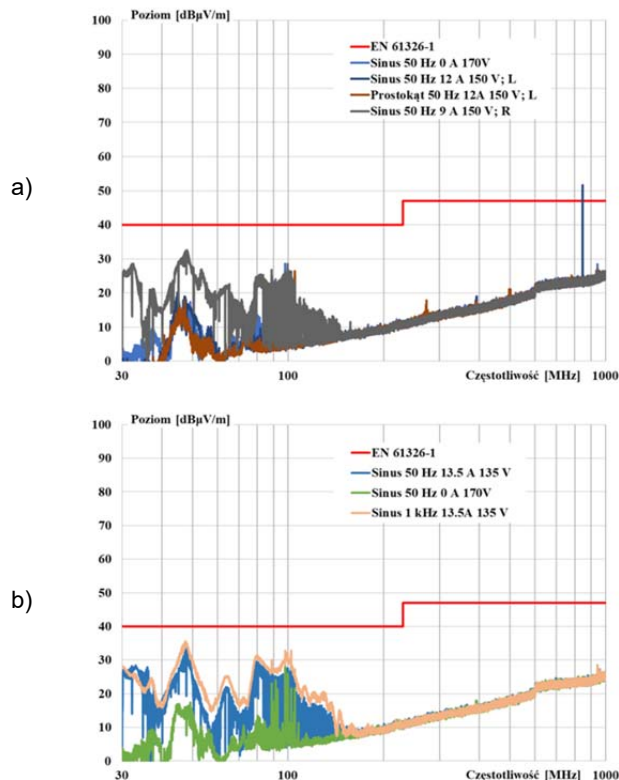
Rys.8. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń promieniowanych przez wzmacniacz audio (urządzenie B) podczas generacji napięć o częstotliwościach: 50 Hz i 1000 Hz dla różnych kształtów napięcia wyjściowego przy obciążeniu a) rezystancyjnym, b) indukcyjnym

Zaburzenia promieniowane generowane przez źródło w powyższych warunkach pracy nie przekraczały dopuszczalnych poziomów określonych w normie PN-EN IEC 61326-1. Ponadto, w przypadku urządzenia B, nie zaobserwowano wpływu częstotliwości generowanego napięcia na poziom emisję zaburzeń promieniowanych. Natomiast porównując wyniki uzyskane dla obciążenia rezystancyjnego i indukcyjnego zauważono, że przy zasilaniu układów rezystancyjnych następuje wzrost emisji zaburzeń promieniowanych o około 20 dBμV/m w przypadku wartości maksymalnej. Wynika to ze zmiany charakterystyki pracy kluczy tranzystorowych.

Na rysunku 9 przedstawiono częstotliwościowe widmo emisji zaburzeń promieniowanych przez wzmacniacz audio. Badania przeprowadzono dla generacji napięcia o częstotliwości 50 Hz i 1 kHz o kształcie sinusoidalnym i prostokątnym.

Przeprowadzone pomiary emisji zaburzeń promieniowanych dla urządzenia B wykazały brak istotnego wpływu częstotliwości generowanego napięcia i jego kształtu oraz wartości skutecznej napięcia i prądu

wyjściowego na ich poziom. Urządzenie jest zgodne z wymaganiami normy PN-EN 61326-1. W tym przypadku także sprawdzono wpływ charakteru obciążenia badanego źródła na wartości emisji promieniowanej i kształtu napięcia wyjściowego. W przypadku gdy, do obciążenia źródła zastosowano rezystor to występuje wzrost emisji promieniowanej.



Rys.10. Widmo częstotliwościowe emisji zaburzeń promieniowanych przez wzmacniacz audio (urządzenie B) podczas generacji napięć o częstotliwościach: 50 Hz i 1000 Hz dla różnych a) rodzajów obciążeń, b) wartości skutecznych napięć i prądów

Analiza wyników pomiarowych emisji przewodzonych zarejestrowanych dla badanych szerokopasmowych źródeł zasilania wskazuje, że w obu przypadkach wartości skuteczne napięć i prądów wyjściowych oraz wartość i charakter obciążenia nie mają istotnego wpływu. W przypadku wzmacniacza audio można wykonywać badania emisji zaburzeń przewodzonych w stanie jałowym. Natomiast dla urządzenia A należy uwzględnić wpływ częstotliwości generowanego napięcia. Zatem, pomiary należy wykonać dla najwyższej częstotliwości generowanego napięcia. Podsumowując wyniki badań emisji promieniowanej zarejestrowane dla badanych szerokopasmowych źródeł zasilania wykazano brak wpływu częstotliwości generowanego napięcia wyjściowego. W przypadku wzmacniacza audio istotne jest aby wykonywać pomiary przy obciążeniu rezystancyjnym (wyższe wartości emisji w porównaniu do obciążenia indukcyjnego). W przypadku źródła PWM istotny wpływ na poziom emisji promieniowanej mają wartości skuteczne prądu i napięcia wyjściowego powodując jej wzrost. Nie stwierdzono natomiast wpływu charakteru obciążenia. Należy zatem prowadzić badania emisji promieniowanej dla znamionowych wartości skutecznych napięcia i prądu wyjściowego oraz różnego charakteru obciążeń.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania EMC programowalnych źródeł zasilania wykazały brak zgodności z wymaganiami normy PN-EN IEC 61326-1 źródła opartego o falownik PWM, przekroczone zostały dopuszczalne wartości emisji zaburzeń promieniowanych. Należy przypuszczać, że producent wykonywał badania w stanie jałowym pracy źródła i generacji napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz. Z tego względu istotne jest aby wykonywać badania EMC w warunkach dopuszczalnej pracy źródła, uwzględniając znamionowe obciążenie i częstotliwość maksymalną generowanego napięcia. W przypadku badanego wzmacniacza audio nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości emisji zaburzeń przewodzonych i promieniowanych. Warto jednak podkreślić, że w tym przypadku istotne jest aby badania wykonywane były przy obciążeniu o charakterze rezystancyjnym.

Autor: mgr. inż. Piotr Kaczmarek, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 22, 90-537 Łódź, E-mail: piotr.kaczmarek@dokt.p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Kaczmarek M., Inductive Current Transformer Accuracy of Transformation for the PQ Measurements. *Electr. Power Syst. Res.* 150 (2017), 169–176, doi:10.1016/j.epsr.2017.05.006.
- [2] Kaczmarek M., The Effect of Distorted Input Voltage Harmonics Rms Values on the Frequency Characteristics of Ratio Error and Phase Displacement of a Wideband Voltage Divider. *Electr. Power Syst. Res.* 167 (2019), 1–8, doi:10.1016/j.epsr.2018.10.013.
- [3] Kaczmarek M., Stano E., Proposal for Extension of Routine Tests of the Inductive Current Transformers to Evaluation of Transformation Accuracy of Higher Harmonics. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 113 (2019), 842–849, doi:10.1016/j.ijepes.2019.06.034.
- [4] Kaczmarek M.L.M.M.L.M.L., Stano E., Mingotti A., Bartolomei L., Peretto L., Tinarelli R., Crotti G., D'Avanzo G., Giordano D., Letizia P.S., et al., Application of the Inductive High Current Testing Transformer for Supplying of the Measuring Circuit with Distorted Current. *IET Electr. Power Appl.* 13 (2019), 1310–1317, doi:10.1049/iet-epa.2018.5803.
- [5] Mingotti A., Bartolomei L., Peretto L., Tinarelli R., On the Long-Period Accuracy Behavior of Inductive and Low-Power Instrument Transformers. *Sensors* 20 (2020), 5810, doi:10.3390/s20205810.
- [6] Cristaldi L., Faifer M., Laurano C., Ottoni R., Toscani S., Zanon M., A Low-Cost Generator for Testing and Calibrating Current Transformers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 68 (2019), 2792–2799, doi:10.1109/TIM.2018.2870264.
- [7] Filipović-Grčić D., Filipović-Grčić B., Krajtner D., Frequency Response and Harmonic Distortion Testing of Inductive Voltage Transformer Used for Power Quality Measurements. In *Proceedings of the Procedia Engineering*; Elsevier B.V., 2017; Vol. 202, pp. 159–167.
- [8] Kaczmarek M., Stano E., Challenges of Accurate Measurement of Distorted Current and Voltage in the Power Grid by Conventional Instrument Transformers. *Energies* 16 (2023), 2648, doi:10.3390/en16062648.
- [9] Stano E., Kaczmarek M., Analytical Method to Determine the Values of Current Error and Phase Displacement of Inductive Current Transformers during Transformation of Distorted Currents Higher Harmonics. *Measurement* 200 (2022), 111664, doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111664.
- [10] Kaczmarek M., Stano E., Application of the Sinusoidal Voltage for Detection of the Resonance in Inductive Voltage Transformers. *Energies* 14 (2021), doi:10.3390/en14217047.
- [11] Stano E., Kaczmarek M., Wideband Self-Calibration Method of Inductive Cts and Verification of Determined Values of Current and Phase Errors at Harmonics for Transformation of Distorted Current. *Sensors* 20 (2020), 2167, doi:10.3390/s20082167.
- [12] Kaczmarek M., Stano E., Nonlinearity of Magnetic Core in Evaluation of Current and Phase Errors of Transformation of Higher Harmonics of Distorted Current by Inductive Current Transformers. *IEEE Access* 8 (2020), 118885–118898, doi:10.1109/ACCESS.2020.3005331.
- [13] Kaczmarek M., Stano E., The Influence of the 3rd Harmonic of the Distorted Primary Current on the Self-Generation of the Inductive Current Transformers. *IEEE Access* 10 (2022), 55876–55887, doi:10.1109/access.2022.3177892.
- [14] Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Understanding the Frequency Characteristics of Current Error and Phase Displacement of the Corrected Inductive Current Transformer. *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15155436.
- [15] Stano E., Kaczmarek P., Kaczmarek M., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Inductive Current Transformers? *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15155737.
- [16] Klatt M., Meyer J., Elst M., Schegner P., Frequency Responses of MV Voltage Transformers in the Range of 50 Hz to 10 KHz. In *Proceedings of the ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*; 2010; pp. 1–6.
- [17] Kaczmarek M., Stano E., Review of Measuring Methods, Setups and Conditions for Evaluation of the Inductive Instrument Transformers Accuracy for Transformation of Distorted Waveforms. *Energies* 16 (2023), doi:10.3390/en16114360.
- [18] Kaczmarek M., Stano E., Why Should We Test the Wideband Transformation Accuracy of Medium Voltage Inductive Voltage Transformers? *Energies* 14 (2021), 4432, doi:10.3390/en14154432.
- [19] Kaczmarek M., Stano E., Measuring System for Testing the Transformation Accuracy of Harmonics of Distorted Voltage by Medium Voltage Instrument Transformers. *Measurement* 181 (2021), 109628, doi:10.1016/j.measurement.2021.109628.
- [20] Lesniewska E., Kaczmarek M., Stano E., 3D Electromagnetic Field Analysis Applied to Evaluate the Accuracy of a Voltage Transformer under Distorted Voltage. *Energies* 14 (2021), 136, doi:10.3390/en14010136.
- [21] Stano E., Kaczmarek M., Badania Odporności Urządzeń Pomiarowych Stosowanych w Obwodach Wieloprądowych Na Pole Magnetyczne o Częstotliwości Sieci Elektroenergetycznej. *Prz. Elektrotechniczny* 95 (2019), 54–57, doi:10.15199/48.2019.03.13.
- [22] Kaczmarek M.L., Stano E., Application of the Inductive High Current Testing Transformer for Supplying of the Measuring Circuit with Distorted Current. *IET Electr. Power Appl.* 13 (2019), 1310–1317, doi:10.1049/iet-epa.2018.5803.
- [23] Kaczmarek M., Kaczmarek P., Stano E., The Performance of the High-Current Transformer during Operation in the Wide Frequencies Range. *Energies* 15 (2022), doi:10.3390/en15197208.
- [24] European Parliament and the Council of European Union, Directive 2014/30/EU of the European Parliament and the Council of 26 February 2014 on the Harmonisation of the Laws of the Member States Relating to Electromagnetic Compatibility; (2014);
- [25] IEC 61326-1, Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory Use - EMC Requirements - Part 1; Geneva, Switzerland, (2013);
- [26] EN 55011, Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment - Electromagnetic Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement; Geneva, Switzerland, (2016);
- [27] Vincenzi F.R.S., Silva L., Gomes de Freitas L.C., Freitas M.A.A., Fernandes E.R., Vieira J.B., Freitas L.C., Programmable AC Power Source Used to Analyze Electronic Equipment Performance in the Electrical Power System Quality Concept. In *Proceedings of the 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*; 2008; pp. 1931–1937.
- [28] Petrovic G., Bosnic J.A., Majic G., Despalatovic M., A Design of PWM Controlled Calibrator of Non-Sinusoidal Voltage Waveforms. *Energies* 12 (2019), doi:10.3390/en12101966.
- [29] Pressman A., Billings K., Morey T., *Switching Power Supply Design*, 3rd Ed.; Mcgraw-hill, (2009); ISBN 9780071482721.
- [30] Kaczmarek M., Kaczmarek P., Comparison of the Wideband Power Sources Used to Supply Step-up Current Transformers for Generation of Distorted Currents. *Energies* 13 (2020), 1849, doi:10.3390/en13071849.
- [31] Brodecki D., Stano E., Andrychowicz M., Kaczmarek P., Emc of Wideband Power Sources. *Energies* 14 (2021), 1457, doi:10.3390/en14051457.