

Damian GONCZ, Arkadiusz GANCARCZYK
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

Pomiary i ograniczanie zaburzeń przewodzonych generowanych przez silniki prądu stałego

Dr inż. Damian GONCZ

Dyplom mgra inż. elektryka uzyskał w 1998 r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej, gdzie również w 2003r. otrzymał stopień doktora w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jest członkiem PTETiS oraz Sekcji Podstaw Metrologii KMiAN PAN. Działalność naukową realizuje w obszarze badań kompatybilności elektromagnetycznej i budowy aparatury pomiarowej do analizy oddziaływań elektromagnetycznych.

e-mail: damian.goncz@polsl.pl



Mgr inż. Arkadiusz GANCARCZYK

Dyplom inż. uzyskał w 2005 r. na Wydziale Matematyczno - Fizycznym Politechniki Śląskiej na kierunku Elektronika i Telekomunikacja o specjalności Optoelektronika i Technika Światłowodowa. W 2007 r. na Wydziale Elektrycznym uzyskał stopień mgra na tym samym kierunku. Obecnie jest doktorantem w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się w obszarze kompatybilności elektromagnetycznej i projektowania komputerowych systemów pomiarowych.

e-mail: arkadiusz.gancarczyk@polsl.pl



Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienia pomiaru i filtracji zaburzeń przewodzonych, wprowadzanych do linii zasilających przez silniki prądu stałego o mocy do 1 kW. Analizie poddano wybrane silniki z komutatorami klasycznymi, wzbudzone magnesami trwałymi i elektromagnesami oraz silniki z komutatorem elektronicznym, wzbudzany magnesami trwałymi. Badania wykonano na specjalnie opracowanym laboratoryjnym stanowisku pomiarowym, sterowanym programem stworzonym w środowisku LabVIEW.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone, filtry EMI.

Measurements and limiting the conducted disturbances generated by DC electric motors

Abstract

Selected problems of measurement and filtration of conducted disturbances in DC low power supply lines are presented in the paper. Disturbances generated by DC low power electric motors (about 1 kW) were measured and analyzed. The exemplary electric motors with classic and electronic commutators were tested. The usefulness of research the conducted disturbances is explained in chapter 1. For the tests a special laboratory stand was worked out (chapter 2). The block diagram of the measuring path and a photo of laboratory stand are shown in Fig. 1. The measurements of conducted emission levels were performed in the frequency range from 150 kHz to 30 MHz. The software was created in LabVIEW environment. Most important results of research are presented in chapter 3. In the Fig. 4 the filter structure for limiting disturbances is shown. Such filter was used in power lines of EUT. Effectiveness of filter operation in tests of electric motors is presented in Fig. 5, 6. The future directions of the work and a main conclusions are pointed out in chapter 4. The influence of exemplary selected line impedance stabilization network (LISN) on the measuring results is also analyzed in the paper. Measurement error of disturbances δU_m is determined (3). The curve of this error is drawn in Fig. 9.

Keywords: electromagnetic compatibility, conducted disturbances, EMI filters.

1. Wstęp

Celowość analizy i ograniczania zaburzeń przewodzonych w liniach zasilających DC umotywowana jest zapewnieniem poprawnej pracy współpracujących urządzeń, zasilanych ze wspólnej linii i znajdujących się w bliskiej odległości. Wzajemne oddziaływanie podzespołów elektronicznych i ich duża skala integracji, pozwala na swobodne rozprzestrzenianie się sygnałów zaburzających w obrębie tego samego środowiska. Niezależnie od sygnału roboczego AC lub DC, zaburzenia są sygnałami promieniowanymi i dla dużych ich częstotliwości, mogą zostać wyemitowane w postaci fali elektromagnetycznej. Bardzo istotne

jest zapewnienie odpowiednich parametrów zasilania w instalacjach pojazdów samochodowych, ze szczególnym uwzględnieniem cywilnych pojazdów użytkowych oraz pojazdów wojskowych. Jednym z głównych źródeł zaburzeń w powyższych instalacjach są napędy elektryczne, generujące interferencje elektromagnetyczne (EMI) o częstotliwościach radiowych (RFI). W ramach badań należy więc rozpoznać poziomy zaburzeń generowanych przez powyższe obiekty oraz zidentyfikować ich szerokość pasma częstotliwości. Największe amplitudy zaburzeń występują w fazie rozruchu silników i należy je analizować zarówno w linii „+”, jak i „-” zasilania, która to linia zazwyczaj stanowi potencjał odniesienia. Pomiary wykonuje się w warunkach laboratoryjnych lub „na obiekcie”, ale zawsze według znormalizowanej metody i w znamionowych warunkach pracy. W niektórych przypadkach zapewnienie znamionowych warunków pracy na stanowisku laboratoryjnym stanowi kłopot, ponieważ maszyna zainstalowana na rzeczywistym obiekcie może być np. krótkotrwale przeciążana. Metodą minimalizacji zaburzeń przewodzonych jest stosowanie odpowiednio dobranych filtrów EMI i dławików wygładzających prądy. Niniejsza problematyka badawcza jest istotna zwłaszcza podczas modernizacji pojazdów samochodowych, polegającej na implementacji w nich współczesnych układów elektronicznych, wrażliwych na zakłócenia zarówno przewodzone, jak i promieniowane.

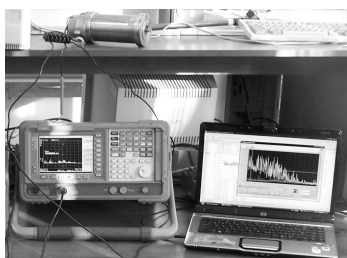
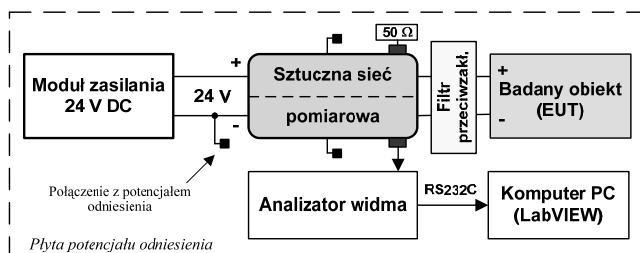
2. Stanowisko pomiarowe

Pomiary zaburzeń przewodzonych przeprowadzono na specjalnie opracowanym laboratoryjnym stanowisku pomiarowym. Stanowisko składa się z układu sztucznych sieci pomiarowych INCO serii SMZ-6/50 w odpowiedniej konfiguracji, odbiornika zaburzeń w postaci analizatora widma Agilent E4411B z detekcją szczytową, modułu zasilania DC (zasilacz lub akumulator) oraz z komputera PC wraz z dedykowanym programem pomiarowym, stworzonym w środowisku LabVIEW. Schemat blokowy toru pomiarowego (struktura filtru zgodna z rys. 4 lub 6) oraz widok fragmentu stanowiska pokazano na rys. 1.

Oprogramowanie pomiarowe pozwala w wygodny sposób pobrać wyniki badań (interfejs RS232C) w liczbie 1200 próbek dla całej szerokości pasma pomiarowego. Wyniki zapisywane są do pliku zgodnego z formatem MS Excel, przetwarzane według zadanych parametrów programu oraz prezentowane w formie graficznej. Analizę zaburzeń wykonano w paśmie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz z szerokością pasma filtru pośredniej częstotliwości 9 kHz. Pomiary przeprowadzono osobno w liniach zasilających „+” i „-”, uwzględniając zaburzenia tła. Wartości zaburzeń wyrażono w dB μ V. Widok okna programu pomiarowego pokazano na rys. 2.

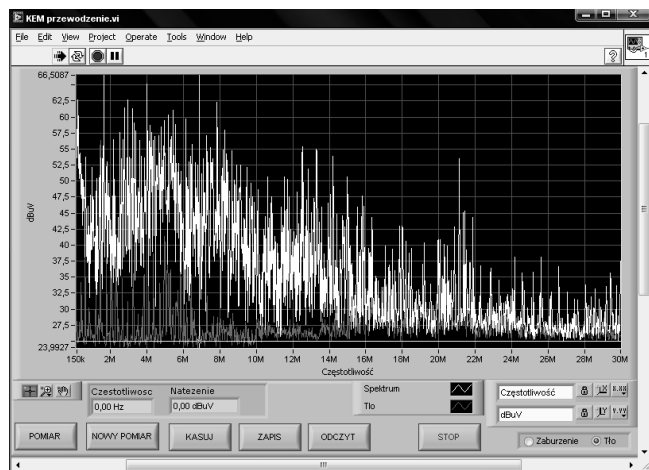
Bardzo istotnym elementem toru pomiarowego jest sztuczna sieć pomiarowa (ang. LISN), która stanowi odpowiednio zaprojektowany zespół filtrów pasywnych. Zadaniem sieci jest: tłumie-

nie zaburzeń pochodzących od źródła zasilania o co najmniej 10 dB w rozpatrywanym paśmie częstotliwości, tłumienie zaburzeń pochodzących od EUT, tak aby nie były bezpośrednio wprowadzane do źródła zasilania, dopasowanie pomiarowego sygnału wyjściowego sieci do wejścia odbiornika zaburzeń, odseparowanie wyjścia pomiarowego od napięcia zasilania w celu ochrony przyrządu pomiarowego oraz zapewnienie stałej wartości impedancji, na której ma się odkładać napięcie zaburzeń. Wszystkie parametry LISN wpływają więc bezpośrednio na dokładność wykonywanych pomiarów, co świadczy, że powinny być poprawnie dobrane.



Rys. 1. Schemat blokowy toru pomiarowego i widok fragmentu stanowiska laboratoryjnego

Fig. 1. Block diagram of the measuring path and a photo of laboratory stand



Rys. 2. Widok okna programu pomiarowego

Fig. 2. Window of the software

Zgodnie z rys. 1 możliwa jest konfiguracja stanowiska z jedną lub dwiema strukturami sztucznych sieci pomiarowych. W przypadku połączenia EUT do masy na docelowym obiekcie pracy (np. do karoserii pojazdu), przewodem „-” o długości ≤ 200 mm (opcja tzw. masy bliskiej), w laboratoryjnych badaniach zaburzeń należy stosować tylko jedną sztuczną sieć w linii „+”. Dla urządzeń z tzw. masą daleką, czyli z rzeczywistym przewodem „-” o długości > 200 mm, w badaniach zaburzeń należy użyć dwóch sieci w obydwu liniach zasilania [1].

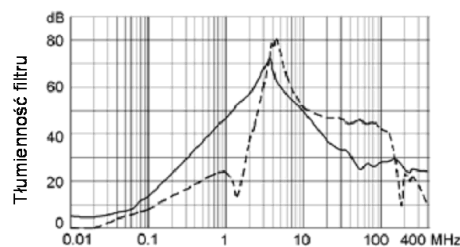
Z racji zastosowania niektórych badanych obiektów w pojazdach samochodowych, zgodnie z [1], istotna jest w analizie szerokość pasma 150 kHz...108 MHz, zaś uwzględniając [2], pasmo powinno się zawierać w przedziale 10 kHz...10 MHz. Rozpatry-

wane w ramach pracy pasmo tylko w pewnym stopniu pokrywa wymagane zakresy, co jest związane z parametrami aktualnie dostępnej i użytej w badaniach struktury sieci pomiarowej.

3. Wyniki badań laboratoryjnych

W niniejszej publikacji przedstawiono przykładowe wyniki badań zarejestrowane dla kilku wybranych silników prądu stałego o mocy rzędu kilkuset watów [3]. Obiekty badań zasilono napięciem stałym 24 V. Zakłócenia przewodzone generowane przez silniki prądu stałego zależą od wielu parametrów takich jak: indukcyjności cewek wirnika i obwodów wzbudzenia, stanowiących parametry konstrukcyjne maszyny, dalej: jakości szczotek, stopnia zużycia komutatora, prędkości obrotowej silnika oraz różnych stanów jego pracy. Większość z tych parametrów niestety nie jest stała w czasie i podlega procesowi losowości, co uniemożliwia zaprojektowanie uniwersalnej struktury filtra przeciwzakłóceniewego.

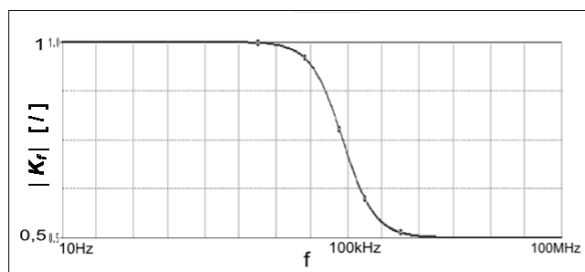
Obecnie na rynku można nabyć filtry przeciwzakłóceniewe dedykowane do stosowania w liniach DC. Producenci w kartach katalogowych zwykle podają dokładne struktury wewnętrzne filtrów wraz z wartościami elementów składowych. Podana struktura określa przydatność danego filtra w tłumieniu zaburzeń wspólnych lub różnicowych. Na rys. 3 pokazano charakterystyki tłumienności przykładowego filtra, dedykowanego do maksymalnej wartości prądu obciążenia 30 A [4].



Rys. 3. Tłumienność filtra dla zaburzeń wspólnych (—) i różnicowych (---)

Fig. 3. Filter attenuation loss for common (—), and differential (---) disturbances

Na rys. 4 pokazano jedną z możliwych typowych struktur filtra przeciwzakłóceniewego dla linii DC.

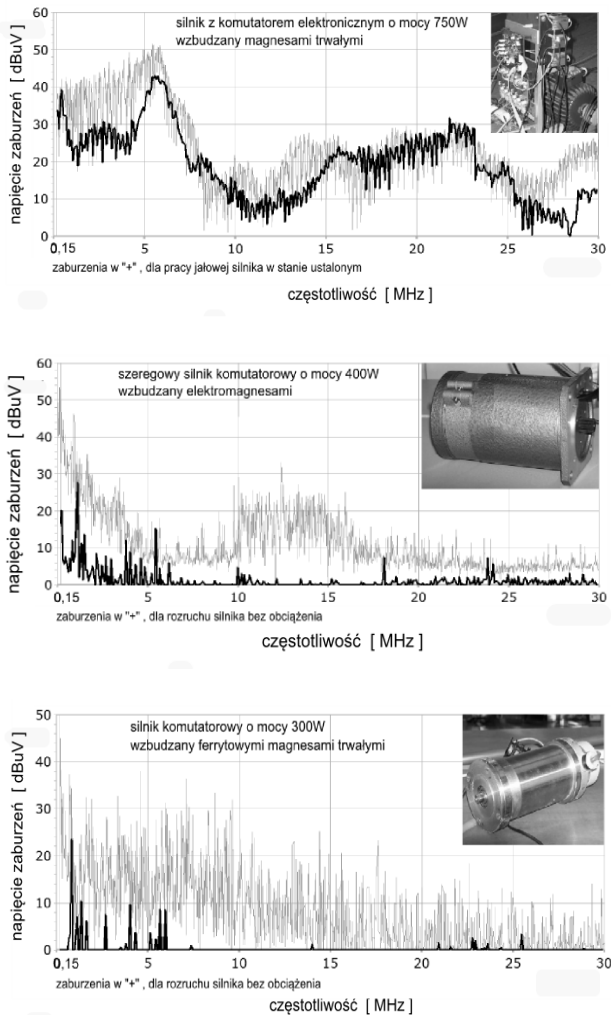


Rys. 4. Przykładowa struktura i transmitancja filtra EMI dla linii zasilających DC

Fig. 4. Exemplary structure and transmittance of EMI filter for DC power line

Po doborze optymalnych parametrów elementów składowych, filtr zainstalowano w torze zasilającym między sztuczną sieć pomiarową, a obiektem badań [3]. Analizę zaburzeń należy wykonać we wszystkich opcjach pracy silnika, możliwych do uzyskania w warunkach rzeczywistych (rozruch, praca jałowa, praca z obciążeniem, różne kierunki wirowania).

Skuteczność działania filtru w przypadku analizowanych odbiorników pokazano na rys. 5. Rysunek przedstawia wybrane wyniki z przeprowadzonych badań. Zaburzenia zarejestrowane bez zastosowania filtracji zaznaczono kolorem szarym, zaś zaburzenia występujące w odfiltrowanej linii, pokazują wykresy koloru czarnego.



Rys. 5. Przykładowe wyniki badań zaburzeń w linii zasilającej DC bez filtra i z filtrem EMI

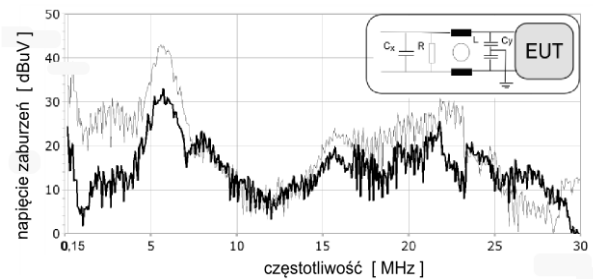
Fig. 5. Exemplary measurement results of disturbances in DC power line without EMI filter and with the filter

W przypadku badania zaburzeń pochodzących od silników, zwłaszcza z komutatorem stykowym, otrzymuje się widmo ciągłe, w którym nie da się jednoznacznie wyodrębnić harmonicznych, interharmonicznych, czy subharmonicznych. Składowe harmoniczne występują w widmie zaburzeń, pochodzącym od silnika z tzw. komutatorem elektronicznym i wynikają zwykle z układu energoelektronicznego, zastosowanego do sterowania silnika. Niestety także i w tym przypadku nie można ich w łatwy sposób wydzielić z całości zwiualizowanego sygnału zaburzającego.

Duża wartość pojemności kondensatora C_X w filtrze tłumia przede wszystkim zaburzenia różnicowe (symetryczne), zaś sprzężone indukcyjności dławików tłumią występujące również w układzie prądy wspólne (asymetryczne). Skuteczność zastosowanego filtru nie jest zadowalająca w przypadku silnika z komutatorem elektronicznym (falownikiem). Wynika to z faktu sporego udziału w zaburzeniach składowych wspólnych, które nie są dobrze eliminowane z powodu braku w strukturze filtru elementów odprowadzających energię prądów wspólnych do potencjału ziemi.

Pewną poprawę tej sytuacji uzyskują się poprzez dodanie do struktury filtru kondensatora klasy Y, przyłączonego do potencjału odniesienia. Przykładowy wynik pomiarów pokazano na rys. 6. Z rysunku widać dużą sprawność filtru w zakresie niższych częstotliwości, co ma znaczenie, ponieważ w tym przedziale amplitudy zaburzeń zmierzone bez filtracji są duże. W przypadku dwóch pozostałych silników, kondensator klasy Y nie daje zauważalnego obniżenia poziomu zaburzeń i jest zbędny.

Używając pojęć „kondensator klasy X lub Y”, należy rozumieć, że w głównej mierze chodzi o strukturę połączeń tych pojemności w układzie, nie zaś o parametry związane z odpornością izolacji powyższych kondensatorów.

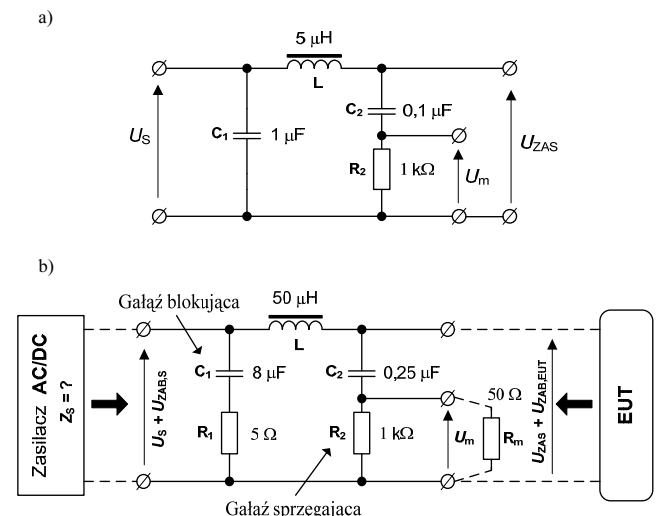


Rys. 6. Poprawa skuteczności filtracji po zastosowaniu kondensatora klasy Y dla silnika sterowanego elektronicznie

Fig. 6. Filtration effectiveness improvement after use the filter with Y class capacitor for electronically controlled motor

4. Kierunek dalszych prac i wnioski

W celu prowadzenia dalszych badań, stanowisko laboratoryjne musi być wyposażone w układy sztucznych sieci pomiarowych, zgodnych z normami [1] i [2], które będą dostosowane do pracy w liniach zasilających DC. Użyte w powyższych badaniach LISN nie są dedykowane do zasilania DC. Należało więc podczas pomiarów zwracać uwagę na wartości prądów pobieranych przez EUT, żeby nie dopuścić do nasycania się rdzeni dławików w sieciach. Aplikacja w torze pomiarowym sieci według norm, pozwoli dopiero porównać wyniki z wartościami granicznymi, zamieszczonymi w tych normach. Rys. 7 przedstawia struktury pojedynczych LISN z narzuconymi wartościami elementów, zgodnie z [1] i [2].



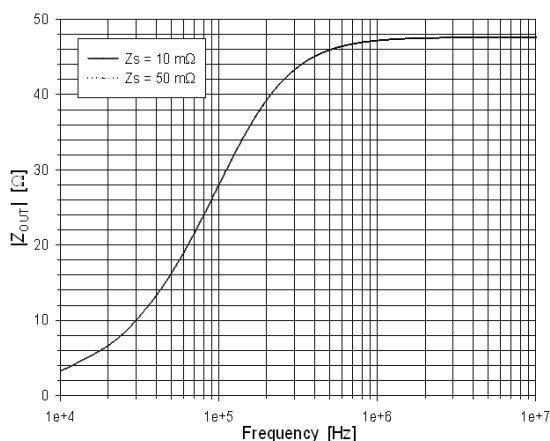
Rys. 7. Struktury LISN do pomiaru zaburzeń przewodzonych zgodnie z normami a) [1], b) [2]

Fig. 7. Structures of LISN for conducted emission measurement according to a) [1], b) [2]

Na schemacie z rys. 7b, zaznaczono charakterystyczne sygnały napięciowe, pomocne do stworzenia matematycznego opisu sieci. W rzeczywistej sytuacji mierzone odbiornikiem zaburzeń napięcie U_m nie jest równe napięciu zaburzeń $U_{ZAB,EUT}$, które generowane jest do linii zasilającej przez badany obiekt [5]:

$$U_m \neq U_{ZAB,EUT} \quad (1)$$

Brak równości w (1) jest wynikiem różnej impedancji, na której napięcie zaburzeń jest mierzone, a impedancji, na której zaburzenia się odkładają faktycznie. Impedancja, na której odkłada się rzeczywiste napięcie zaburzeń jest impedancją widzianą z zacisków wyjściowych sieci, wyznaczoną bez obiektu EUT i uwzględniającą impedancję źródła zasilania oraz rezystancję przyrządu pomiarowego. Moduł tej impedancji w zakresie niższych częstotliwości nie jest stały, co pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Impedancja wyjściowa sztucznej sieci pomiarowej
Fig. 8. Output impedance of LISN

Impedancja wyjściowa sieci liczona jest z zależności:

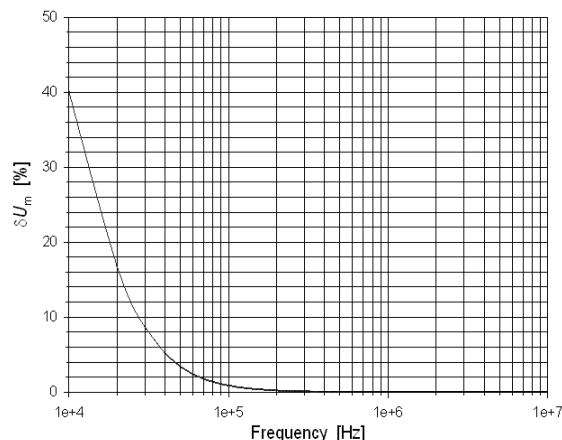
$$Z_{OUT} = \frac{\left[\frac{Z_s \cdot \left(R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \right)}{Z_s + R_1 - j \frac{1}{\omega C_1}} + j\omega L \right] \cdot \left[\frac{R_2 \cdot R_m - j \frac{1}{\omega C_2}}{R_2 + R_m} \right]}{\frac{Z_s \cdot \left(R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \right)}{Z_s + R_1 - j \frac{1}{\omega C_1}} + j\omega L + \frac{R_2 \cdot R_m - j \frac{1}{\omega C_2}}{R_2 + R_m}} \quad (2)$$

Poddając analizie zaburzenia na zaciskach obiektu badanego (EUT), podłączonego bezpośrednio do LISN przewodami zasilającymi stanowiącymi wraz z tym obiektem jedną całość, można dla powyższej struktury sieci zapisać zależność na błąd pomiaru zaburzeń:

$$\delta U_m = \left[\frac{\frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m}}{\frac{R_2 \cdot R_m - j \frac{1}{\omega C_2}}{R_2 + R_m}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Wykres błędu δU_m w paśmie częstotliwości 10 kHz ... 10 MHz, przedstawiono na rys. 9. Z wykresu wynika, że aż do częstotliwości ok. 100 kHz, sieć wprowadza znaczący błąd składowy, który powinno się uwzględnić w budżecie niepewności całego toru pomiarowego. Budżet powinien obejmować wszystkie niepewności składowe, wnoszone przez kolejne bloki funkcyjne toru, włącznie z wpływem przewodów zasilających EUT, o ile przewo-

dy te nie są integralną częścią obiektu badań. Rozważając przypadek wpływu przewodów, kiedy nie stanowią one całości z EUT, zależność opisująca błąd sieci pomiarowej (3) będzie bardziej złożona.



Rys. 9. Błąd pomiaru napięcia zaburzeń δU_m
Fig. 9. Measurement error of disturbances δU_m

Analiza zaburzeń pochodzących od silników prądu stałego nie jest zagadnieniem powszechnie poruszonym w literaturze. Niniejsza praca w dużej mierze miała charakter poznawczy i dalsze kierunki badań będą dotyczyć opracowania skutecznych metod minimalizacji zaburzeń od silników, ze szczególnym uwzględnieniem coraz powszechniej stosowanych silników sterowanych elektronicznie, zwłaszcza w obszarze motoryzacji.

Tak ukierunkowane badania mają znaczący związek z pracami o charakterze badawczo-rozwojowym, prowadzonymi przez autorów publikacji, a dotyczącymi modernizacji napędów elektrycznych w pojazdach samochodowych.

Kierunek prac jest dość trudny np. z uwagi na brak bezpośredniego dostępu do ziemi odniesienia w instalacjach pokładowych pojazdów. Rozwiązanie pokazane na rys. 6, nie będzie więc łatwe do implementacji w zastosowaniach motoryzacyjnych.

Z powyższego wynika również wymóg stworzenia odpowiednich warunków laboratoryjnych do badań zaburzeń od obiektów z tzw. grupy „automotive”, polegających na zastosowaniu separacji zasilania przyrządów toru pomiarowego (analogizator, PC oraz zasilacz AC/DC) od linii AC 230 V. Do tego celu najlepiej wykorzystać transformatory separujące, zaś jako źródła zasilania użyć akumulatora.

5. Literatura

- [1] Polska norma PN-EN 55025, „Charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych w odniesieniu do ochrony odbiorników wykorzystywanych w pojazdach, łodziach motorowych i maszynach. Poziomy dopuszczalne i metody pomiarów”, opracowana przez KT nr 104 ds. Kompatybilności Elektromagnetycznej i zatwierdzona w dniu 19.01.2007r.
- [2] Norma MIL-STD-461E, „Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment”, Department of Defense Interface Standard, 20.08.1999r.
- [3] Gonszc D., Gancarczyk A.: Ograniczanie zaburzeń przewodzonych wprowadzanych do sieci zasilającej przez silniki prądu stałego, Mat. Konf. „Podstawowe Problemy Metrologii”, Sucha Beskidzka, 2009.
- [4] Karta katalogowa filtra dla linii DC typu FMEB firmy SCHURTER Electronic Components, www.schurter.com.
- [5] Ruszel P.: Sieć sztuczna elementem toru pomiarowego, PAK vol. 53, nr 10/2007.