

Weryfikacja pomiarowa podatności wzmacniaczy operacyjnych na zaburzenia radioelektryczne

Streszczenie. W artykule omówiono wyniki pomiarów podatności wybranych typów wzmacniaczy operacyjnych na zaburzenia elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych. Pomiar przeprowadzono dla układu wzmacniacza różnicowego. Zastosowany układ umożliwił pomiar zmian składowej stałej napięcia wyjściowego wzmacniacza przy równoczesnym wprowadzeniu zaburzeń na wejścia odwracające i nieodwracające, co odpowiada typowym sytuacjom, z jakimi mamy do czynienia w przypadku ekspozycji rzeczywistego układu elektronicznego na zaburzenia promieniowane. Zweryfikowano jakościową zgodność wyników pomiarów z prostym modelem matematycznym opisującym zmianę składowej stałej napięcia wyjściowego wzmacniacza w funkcji amplitudy sygnału w.cz.

Abstract. In the paper the experimental verification of susceptibility to EMI of chosen operational amplifiers is presented. The op-amp measurements have been performed in a test set being the differential amplifier. Applied measurement test set allows convenient examination of output DC drift in the presence of EMI by simulating a close to real-life situation in which RF signals are introduced simultaneously to both inputs of op-amp. A qualitative agreement between measurements and a simple mathematical model describing the DC offset drift of operational amplifier as a function of RF interference amplitude has been verified. (**Experimental Verification of Susceptibility to EMI of Operational Amplifiers**).

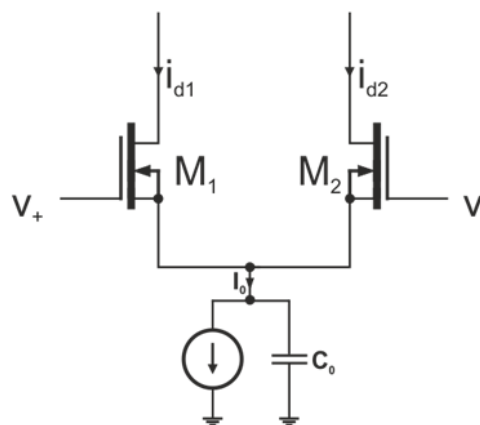
Słowa kluczowe: wzmacniacz operacyjny, zaburzenia radioelektryczne, kompatybilność elektromagnetyczna, odporność promieniowana
Keywords: operational amplifiers, RF interferences, electromagnetic compatibility, radiated immunity.

Wstęp

Wzmacniacze operacyjne są szeroko stosowane w konstrukcji wejściowych obwodów wzmacniających i filtrujących urządzeń mierzących mikrowoltowe sygnały elektryczne małych częstotliwości (np. w sprzęcie medycznym), gdzie pożądana jest mała i stabilna w czasie wartość offsetu napięcia stałego toru. Wrażliwość wzmacniaczy operacyjnych na zaburzenia elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych jest odnotowana w literaturze, gdzie znaleźć można zarówno wyniki prac teoretycznych jak i eksperymentalnych. [1]-[11]. Zaburzenia radioelektryczne o stałej w czasie obwiedni powodują wzrost składowej stałej obserwowanej na wyjściu wzmacniacza, za który to efekt odpowiada głównie wzmacniacz różnicowy znajdujący się na jego wejściu. Obserwowany podczas pomiarów przyrost składowej stałej jest, w szerokim zakresie zmian wartości napięcia w.cz., proporcjonalny do kwadratu amplitudy sygnału zaburzenia, co jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi [5]-[8].

Parametrem charakteryzującym odporność wzmacniacza na zaburzenia radioelektryczne w.cz. jest tzw. EMIRR (*EM Interferences Rejection Ratio*) [2], [3], podawany przez niektórych producentów w notach katalogowych. Jest on liczbowo równy ilorazowi amplitudy sygnału w.cz. do wywołanej przez ten sygnał zmiany wyjściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniacza. Parametr EMIRR powinien być wyznaczony dla amplitudy napięcia zaburzenia równego 100 mV, oddzielnie dla każdego z wyprowadzeń wzmacniacza. Znajomość parametru EMIRR pozwala, zakładając kwadratową zależność pomiędzy zmianą offsetu wzmacniacza a poziomem sygnału w.cz., na wyznaczenie odpowiedzi wzmacniacza na zaburzenia o znanej amplitudzie. W literaturze można jednak znaleźć doniesienia sugerujące, że EMIRR nie jest wystarczający do opisu zachowania wielu rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych w obecności sygnałów w.cz. [4]. Fakt ten jest jednym z powodów podjęcia prac opisanych w niniejszym artykule. W opinii autorów główną słabością parametru EMIRR jest jednak to, że opisuje on zachowanie wzmacniacza w sytuacji gdy zaburzenie występuje jedynie na jednym wyprowadzeniu wzmacniacza. W praktycznych przypadkach ekspozycji układów zawierających

wzmacniacze operacyjne na zaburzenia promieniowane mamy natomiast do czynienia z równoczesnym



Rys.1. Wejściowy wzmacniacz różnicowy na tranzystorach nMOS

występowaniem sygnału w.cz. o różnych amplitudach i fazach we wszystkich punktach układu elektronicznego.

W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów wpływu zaburzeń radioelektrycznych na wybrane wzmacniacze operacyjne. Zbadano odpowiedź wzmacniacza na zaburzenia podane jednocześnie na wejścia odwracające i nieodwracające w konfiguracji wzmacniacza różnicowego. Otrzymane wyniki skonfrontowano z wynikami rozważań teoretycznych bazujących na modelu matematycznym opisującym podatność wzmacniacza na zaburzenia w.cz. podane na jego wejścia.

Podatność wzmacniaczy operacyjnych na zaburzenia radioelektryczne

W opublikowanych w literaturze przedmiotu pracach [5]-[11] wskazuje się, że za wrażliwość wzmacniacza na zaburzenia o częstotliwościach radiowych odpowiada głównie wejściowy wzmacniacz różnicowy. W dalszej części artykułu skrótkowo opisano model takiego oddziaływania dla wzmacniacza wykonanego w technologii MOS. Analiza wzmacniaczy bipolarnych prowadzi do jakościowo identycznych wniosków [6].

Zaprezentowany w artykule model matematyczny bazuje na przybliżeniu zależności opisujących wejściowy wzmacniacz różnicowy (patrz rys. 1) wielomianem drugiego stopnia. Analiza taka prowadzi do następującego wzoru wiążącego zmianę różnicowego prądu wyjściowego wzmacniacza Δi_d w funkcji wejściowego napięcia różnicowego v_D [6]

$$(1) \quad \Delta i_d = i_{d1} - i_{d2} = g_m v_D + g_p v_D^2 i_0$$

gdzie g_m jest transkonduktancją tranzystora, g_p – współczynnikiem proporcjonalności a i_0 przyrostem prądu i_0 na skutek zmiany napięć wejściowych. Ograniczając się jedynie do pobudzeń harmonicznie zmiennych w czasie

$$(2) \quad v_+ = V_+ \cos(\omega t) \quad v_- = \pm V_- \cos(\omega t)$$

napięcie różnicowe na wejściu wzmacniacza jest równe

$$(3) \quad v_D = v_+ - v_- = (V_+ \mp V_-) \cos(\omega t)$$

a napięcie wspólne

$$(4) \quad v_{CM} = \frac{v_+ + v_-}{2} = \frac{V_+ \pm V_-}{2} \cos(\omega t)$$

Zmiana prądu i_0 jest związana z napięciem wspólnym wzorem

$$(5) \quad i_0 = v_{CM} |Y(j\omega)| \cos(\omega t + \varphi_Y)$$

Gdzie

$$(6) \quad Y(j\omega) = \frac{2g_m j\omega C_0}{j\omega(C_{GS} + C_0) + 2g_m} = |Y(j\omega)| e^{j\omega\varphi_Y}$$

C_{GS} to pojemność bramka-źródło tranzystora MOS. Ostatecznie, składowa stała wyjściowego prądu różnicowego będąca efektem występowania zaburzenia jest równa

$$(7) \quad \bar{\Delta} i_d = \frac{1}{4} g_p |Y(j\omega)| (V_+^2 - V_-^2) \cos(\varphi_Y)$$

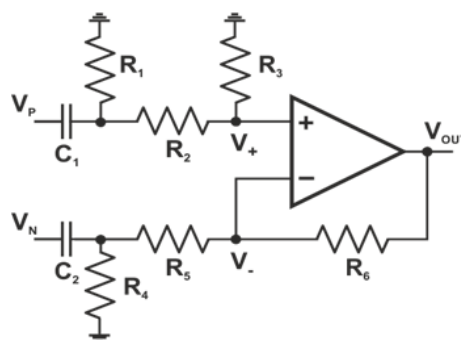
Zmiana napięcia wyjściowego wzmacniacza jest proporcjonalna do zmiany prądu Δi_d [6].

Przedstawione zależności pokazują, że w przypadku obecności sygnału w.cz. tylko na jednym wejściu wzmacniacza (odwracającym lub nieodwracającym) obserwowany dryft składowej stałej na jego wyjściu powinien być proporcjonalny do kwadratu amplitudy zaburzenia. Jest to wniosek potwierdzony eksperymentalnie i symulacyjnie dla szerokiej klasy wzmacniaczy, zarówno dla klasycznych wzmacniaczy o pracy ciągłej [6], [11] jak i wzmacniaczy z przetwarzaniem [8], [11]. Dodatkowo, w przypadku zaburzeń występujących jednocześnie na obu wejściach wzmacniacza w fazach zgodnych lub przeciwnych, dryft składowej stałej napięcia wyjściowego powinien być superpozycją dryftów obserwowanych niezależnie przy obecności zaburzeń na każdym z dwóch wejść wzmacniacza z osobna.

Wyniki pomiarów

Pomiary zmian składowej stałej napięcia wyjściowego wzmacniaczy przeprowadzono w układzie wzmacniacza różnicowego pokazanym na rys. 2. Wartości rezystorów dobrano tak, żeby wzmocnienie układu było równe 100. Rezystory R_1 i R_4 o wartości 50 Ω zapewniają dopasowanie falowe dla sygnałów w.cz. Zastosowany układ umożliwił

wykonanie pomiarów zarówno przy podaniu sygnału w.cz. na każde z wejść wzmacniacza osobno jak również w sytuacji, gdy zaburzenia podane są równocześnie na oba



Rys.2. Schemat układu wzmacniacza różnicowego

wejścia wzmacniacza. Ta druga konfiguracja nawiązuje do sytuacji spotykanych w praktyce, np. podczas badań kompatybilnościowych, gdzie całe urządzenie oświetlane jest zewnętrznym polem elektromagnetycznym i sygnały zaburzeń występują w każdym punkcie badanego układu. Podawanie sygnału zaburzeń tylko na jedno wejście wzmacniacza jest natomiast typowe dla pomiarów mających ocenić odporność konkretnego typu wzmacniacza na zaburzenia, np. w celu wyznaczenia wartości parametru EMIRR.

Badania przeprowadzono dla czterech konfiguracji układu pomiarowego:

- konfiguracja 1 (rys. 3): oba wejścia układu (V_n i V_p) pobudzone sygnałami o zgodnych fazach i równych amplitudach,
- konfiguracja 2 (rys. 4): oba wejścia układu (V_n i V_p) pobudzone sygnałami o przeciwnych fazach i równych amplitudach,
- konfiguracja 3 (rys. 5): wejście V_n zwarte do masy, wejście V_p pobudzone tak jak w konfiguracji 1. lub 2.,
- konfiguracja 4 (rys. 6): wejście V_p zwarte do masy, wejście V_n pobudzone tak jak w konfiguracji 1. lub 2.

Podczas badań sygnał z generatora w.cz. podany był na szerokopasmowy mostek kierunkowy, którego zadaniem było wytworzenie dwóch sygnałów o równych amplitudach i zgodnych lub przeciwnych fazach. Błędy amplitudy w zakresie częstotliwości wykorzystywanych podczas badań nie przekraczały 0.2 dB a błędy fazy były mniejsze niż 4 stopnie. Ich wpływ na wyniki pomiarów jest pomijalny.

Zastosowany układ pomiarowy pozwala na kontrolę wartości napięć V_+ i V_- na wejściach wzmacniacza operacyjnego poprzez zmianę napięć na wejściach V_p i V_n . Za pomocą symulatora pełnofalowego CST Microwave Studio sprawdzono, że w analizowanym zakresie częstotliwości obowiązuje zależność

$$(8) \quad V_+ = B(j\omega)V_p \quad V_- = B(j\omega)V_n$$

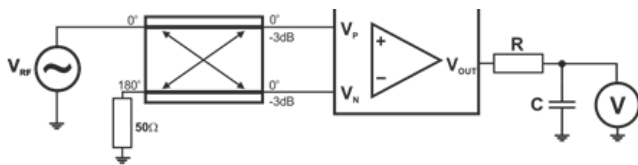
tzn. że napięcia V_+ i V_- są proporcjonalne do napięć V_p i V_n na wejściach układu z tym samym współczynnikiem proporcjonalności $B(j\omega)$. Przy spełnieniu tego warunku na wyniki pomiarów wykonanych z zastosowaniem układu pomiarowego można przenieść te same wnioski, które wynikają z równania (7) dla wzmacniacza: przy pobudzeniu układu w fazach zgodnych lub przeciwnych dryft składowej stałej napięcia wyjściowego powinien być superpozycją dryftów obserwowanych niezależnie przy pobudzeniu układu na każdym z dwóch wejść z osobna.

Pomiary wykonano dla trzech różnych typów wzmacniaczy operacyjnych: LMP2021 [12], OPA188 [13] wzmacniacze z przetwarzaniem wykonane w technologii

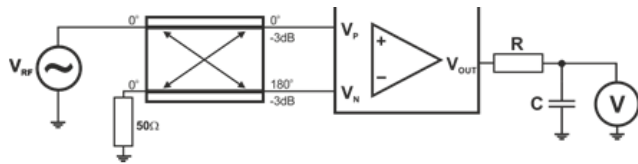
MOS. LT6015 jest precyzyjnym wzmacniaczem bipolarnym o pracy ciągłej. Podstawowe parametry badanych wzmacniaczy zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry badanych wzmacniaczy operacyjnych

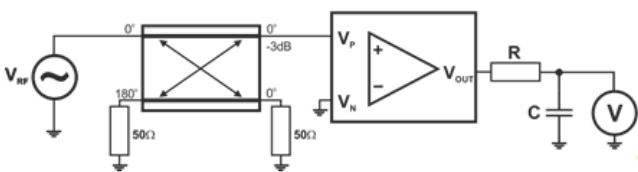
	LMP2021	LT6015	OPA188
wejściwe napięcie niezrównoważenia	0.4 uV	50 uV	25 uV
wzmocnienie różnicowe	160 dB	130 dB	136 dB
GBP	5 MHz	3.2 MHz	2 MHz
CMRR	139 dB	126 dB	146 dB
SR	2.6 V/us	0.75 V/us	0.8 V/us
EMIRR (400 MHz)	40 dB	nie podano	60 dB



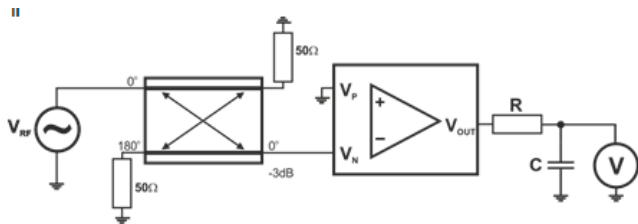
Rys.3. Układ pomiarowy w konfiguracji 1



Rys.4. Układ pomiarowy w konfiguracji 2



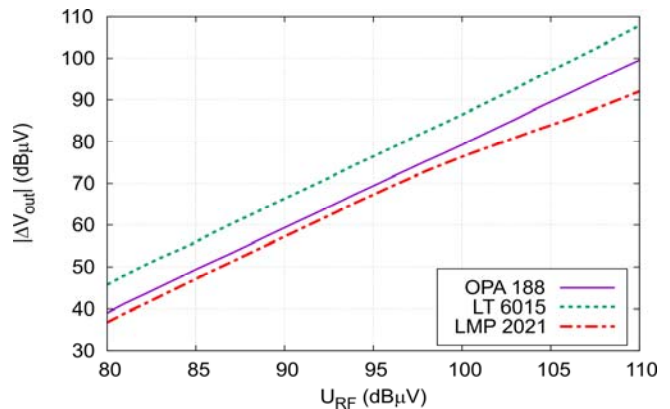
Rys.5. Układ pomiarowy w konfiguracji 3



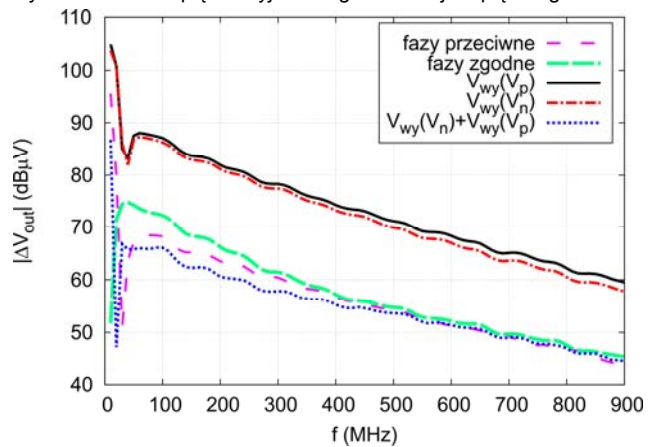
Rys.6. Układ pomiarowy w konfiguracji 4

Na rys. 7 pokazano zmianę składowej stałej napięcia na wyjściu wzmacniaczy w funkcji napięcia generatora podawanego na ich wejścia, dla częstotliwości 100 MHz. Pomiar wykonano w konfiguracji 3 układu pomiarowego. Jak widać, zależność ta jest praktycznie kwadratowa dla wszystkich badanych wzmacniaczy, tak jak to wynika z równania (7). Nieznaczne odchylenie od tej zależności obserwuje się dla wzmacniacza LMP2021 dla poziomów napięcia wejściowego powyżej 100 dB μ V. Pomiar zmian składowej stałej napięcia wyjściowego ΔV_{out} przeprowadzono dla napięcia generatora 107 dB μ V w funkcji częstotliwości z zakresu 10-900 MHz. Wyniki pomiarów pokazano na rys. 8-10, odpowiednio, dla wzmacniaczy LMP2021, OPA188 i LT6015. Na każdym z rysunków zamieszczono pięć krzywych. Cztery z nich

obrazują wyniki pomiarów przeprowadzonych dla każdej z analizowanych konfiguracji układu pomiarowego. Ostatnia krzywa jest wynikiem sumowania zmian napięć wyjściowych dla danego wzmacniacza wyznaczonych niezależnie dla wariantów 3 i 4 układu pomiarowego.



Rys.7. Zmiana napięcia wyjściowego w funkcji napięcia generatora

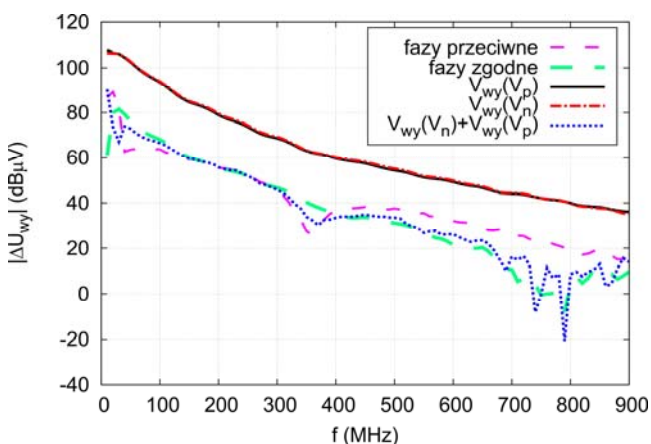


Rys.8. Wyniki pomiarów dla wzmacniacza LMP2021

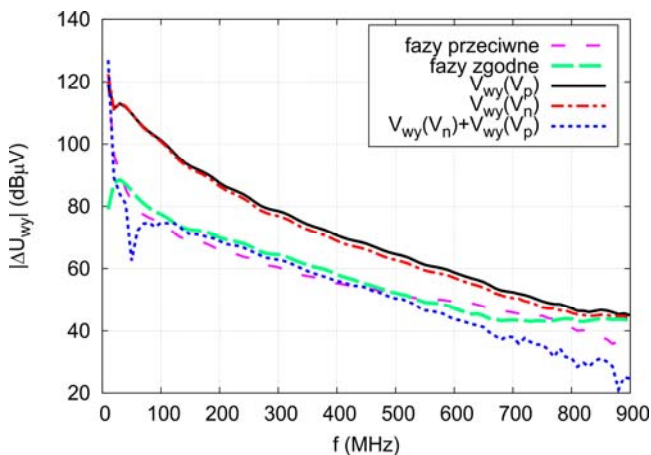
Wyniki pomiarów dla konfiguracji 3 i 4 pokazują, że dla każdego z badanych wzmacniaczy charakter częstotliwościowy oddziaływań jest podobny. Przy stałym poziomie napięcia sygnału w.c.z. przyrost składowej stałej maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Co prawda kierunek zmian składowej stałej napięcia wyjściowego zależy od tego, czy sygnał zaburzenia podany jest na wejście odwracające czy nieodwracające wzmacniacza (tak jak to wynika z równania (7)), ale bezwzględne przyrosty napięcia wyjściowego są praktycznie identyczne przy podaniu zaburzenia osobno na każde z wejść. Porównanie wartości bezwzględnych zmiany napięcia wyjściowego wyznaczonych w konfiguracjach 3 i 4 pokazuje różnice w oddziaływaniu zaburzeń podanych na wejście odwracające lub nieodwracające. Największą symetrią cechuje się tutaj wzmacniacz OPA188, gdzie wyniki uzyskane w obu konfiguracjach są praktycznie nierozróżnialne. Dla wzmacniaczy LMP2021 i LT6015, począwszy od około 200 MHz obserwuje się różnice w wynikach sięgające do około 2 dB dla końca pasma analizy.

Zgodnie z równaniem (7), jednoczesne pobudzenie wzmacniacza operacyjnego na obu wejściach sygnałami o fazach zgodnych lub przeciwnych powinno prowadzić do kompensacji zmiany składowej stałej napięcia wyjściowego wzmacniacza, a obserwowany w takiej sytuacji przyrost napięcia wyjściowego powinien być równy sumie przyrostów składowych DC wyznaczonych przy pobudzeniu

układu osobno, na jednym albo drugim wejściu. Oznacza to, że przyrost napięcia wyjściowego zmierzony w konfiguracji 1 lub 2, powinien być równy sumie przyrostów wyznaczonych w konfiguracjach 3 i 4. Jak jednak widać na zamieszczonych rysunkach, takie rozumowanie daje bardzo dokładne wyniki dla wzmacniacza LMP2021 począwszy dopiero od około 500 MHz. Superpozycja wyników pomiarów w konfiguracjach 3 i 4 prowadzi, dla mniejszych częstotliwości, do niedoszacowania napięcia na wyjściu wzmacniacza nawet o około 10 dB. Dla wzmacniacza OPA188 przy pobudzeniu sygnałami o fazach zgodnych (konfiguracja 1) dość dobrą zgodność uzyskuje się prawie w całym paśmie częstotliwościowym. Przy pobudzeniu sygnałami o fazach przeciwnych, w paśmie 100–300 MHz wyniki są praktycznie identyczne jak przy pobudzeniu w fazach zgodnych. Jednakże w miarę wzrostu częstotliwości wyniki dla tych konfiguracji różnią między sobą nawet o 20 dB, a tym samym dla pobudzenia w fazach przeciwnych superpozycja napięć wyjściowych zmierzonych dla konfiguracji 3 i 4 przestaje dawać poprawne wyniki.



Rys.9. Wyniki pomiarów dla wzmacniacza OPA188



Rys.10. Wyniki pomiarów dla wzmacniacza LT6015

W przypadku wzmacniacza LT6015 dość dobra zgodność wyników dla pobudzenia sygnałami o fazach zgodnych i przeciwnych otrzymuje się praktycznie w całym paśmie, a dodanie do siebie wyników otrzymanych w konfiguracjach 3 i 4 daje dobrą dokładność dla częstotliwości 100- 600 MHz.

Podsumowanie

Analiza wyników pomiarów składowej stałej na wyjściu wzmacniaczy operacyjnych będącej efektem obecności sygnałów w.cz. podanych na wejścia odwracające lub nieodwracające pokazuje dobrą zgodność z modelem matematycznym (7) w przypadku pobudzenia wzmacniacza na jednym wejściu. Dla jednoczesnego pobudzenia wzmacniacza na obu wejściach rozbieżności wyników w stosunku do wyników superpozycji mogą sięgać nawet do 35 dB. Fakt ten skłania autorów do wniosków, że parametry takie jak EMIRR powinny być stosowane jedynie do porównania własności różnych typów wzmacniaczy na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w ściśle określonych warunkach, ale mogą być niewystarczające do opisu zachowania wzmacniaczy pracujących w rzeczywistych warunkach.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (umowa nr PBS3/B3/34/2015).

Autorzy: dr inż. Dariusz Wójcik, dr inż. Maciej Surma, dr inż. Artur Noga, dr inż. Mirosław Magnuski, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: dwojcik@polsl.pl, msurma@polsl.pl, anoga@polsl.pl, mmagnuski@polsl.pl, mgr inż. Jan Mocha, Instytut Techniki i Aparatury Medycznej ITAM, ul. F. Roosevelta 118, 41-800 Zabrze E-mail: jmocha@itam.zabrze.pl.

LITERATURA

- [1] Ramdani M. et al., The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits – Past, Present, and Future, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51 (2009), 78-100
- [2] Analog Devices, RFI Rectification Concepts, MT-096 Tutorial
- [3] Texas Instruments, A Specification for EMI Hardened Operational Amplifiers, AN-1698 Application Report
- [4] Aimonetto M.B., On the Effectiveness of EMIRR to Qualify OpAmps, *Electromagnetic Compatibility, 2015 IEEE International Symposium on* (2015), 16-22.
- [5] Fiori F., Crovetto P.S., Nonlinear Effects of Radio-Frequency Interference in Operational Amplifiers, *IEEE Transactions on Circuit and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 49 (2002), n. 3, 367-372
- [6] Fiori F., Crovetto P. S., Pozzolo V., Prediction of RF interference in operational amplifiers by a new analytical model, *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.* (2001), 1164-1168
- [7] Fiori F., Design of an Operational Amplifier Input Stage Immune to EMI, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 49 (2007), n. 4, 834-839
- [8] Fiori F., On the Susceptibility of Chopper Operational Amplifiers to EMI, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 58 (2016), 1000 - 1006
- [9] Lavarda A., Deutschmann B., Effects of Single Tone RF Interferences on Chopped Operational Amplifiers, *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.* (2015), 96 - 101
- [10] Gago J et al., EMI susceptibility model of signal conditioning circuits based on operational amplifiers, *IEEE Trans. Electromagnetic. Comput.*, 49 (2007), n. 4, 849-859
- [11] Wójcik D. et al., Efekty nieliniowe w obwodach wejściowych aparatury elektromedycznej a odporność na zaburzenia promieniowane, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 1, 225-228
- [12] LMP202x Zero-Drift, Low-Noise, EMI-Hardened Amplifiers (Rev. G), product datasheet
- [13] OPA188 Precision, Low-Noise, Rail-to-Rail Output, 36-V, Zero-Drift Operational Amplifier (Rev. B), product datasheet
- [14] LT6015/LT6016/LT6017 - 3.2MHz, 0.8V/ μ s Low Power, Over-The-Top Precision Op Amps