

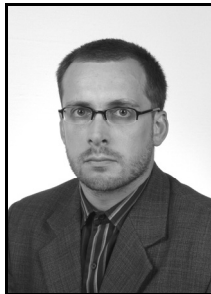
Damian GONSCZ

INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI, POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Sieci sprzęgająco-odsprzęgające stosowane w badaniach kompatybilności elektromagnetycznej

Dr inż. Damian GONSCZ

Autor urodził się w 1973r. Dyplom mgra inż. uzyskał w 1998r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej, gdzie w 2003r. otrzymał stopień doktora w dyscyplinie elektrotechnika. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Komisji Metrologii PAN oraz SEP. Działalność naukową realizuje w obszarze badań kompatybilności elektromagnetycznej i budowy aparatury pomiarowej do analizy oddziaływań elektromagnetycznych.



e-mail: damian.gonscz@polsl.pl

Streszczenie

Publikacja obejmuje analizę wybranych struktur sprzęgająco-odsprzęgających (CDN), wykorzystywanych w pomiarach emisji i testach odporności. Scharakteryzowano niektóre procedury badań oraz aparaturę laboratoryjną. Wykonano analizy symulacyjne obwodów sprzęgających w CDN, istotnych dla struktur dedykowanych do pomiarów poziomów zaburzeń przewodzonych oraz obwodów odsprzęgających, pełniących ważną rolę, szczególnie w testach odporności. Analizy pozwoliły określić m.in. wybrane parametry metrologiczne sieci oraz poznać poprawność ich działania.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, pomiary zaburzeń przewodzonych, testy odporności na zaburzenia, sieci sprzęgająco-odsprzęgające.

Coupling-decoupling networks in EMC tests

Abstract

The paper deals with the analysis of coupling-decoupling networks (CDN) for measurements of the levels of conducted disturbances and for immunity tests of electrical equipments against conducted disturbances. The metrological analysis of an exemplary typical line impedance stabilization network (LISN) for measurements of disturbances in AC and DC power supply lines is presented in Section 2. The diagram of the discussed structure of LISN is shown in Fig. 1. The curve of measured output impedance of LISN is presented in Fig. 4, while the relative measurement error of electromagnetic disturbances for exemplary LISN is shown in Fig. 5. The circuits of coupling-decoupling networks used in the immunity tests of electrical devices against surge disturbances are characterized in Section 3. CDN structures used in BURST and SURGE tests in AC and DC power lines and signal lines are discussed. Investigations of CDN include computer simulations and laboratory measurements. The exemplary results of simulation analysis for the BURST test in a DC power supply line are given in Fig. 7. The measuring results for the SURGE test in a signal line are shown in Fig. 12. The conclusions and the most important practical hints are presented in Section 4. The problems with interpretation of immunity test results are discussed.

Keywords: electromagnetic compatibility, measurements of conducted disturbances, immunity tests against disturbances, coupling-decoupling networks.

1. Wprowadzenie

Istota badań kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrotechnicznych (EUT), w ogólnym ujęciu polega na analizie poziomów zaburzeń przewodzonych i promieniowanych oraz na wykonaniu szeregu testów odporności na zaburzenia przewodzone i promieniowane. Całokształt analizy i rodzaje badań dla danej grupy urządzeń określają normy ogólne i przedmiotowe, zharmonizowane z Dyrektywą Kompatybilności Elektromagnetycznej 2004/108WE.

Badania w obrębie zaburzeń przewodzonych, wykorzystują cały szereg dedykowanych struktur RLC, stanowiących obwody sprzęgająco-odsprzęgające. Zadaniem obwodu sprzęgającego w CDN jest

zapewnienie połączenia galwanicznego o odpowiednich parametrach w celu zmierzenia poziomu sygnału zaburzającego w analizowanym obwodzie lub w celu wprowadzenia do tego obwodu testowych sygnałów zaburzających, co ma miejsce w przypadku realizacji badań odporności. Obwód odsprzęgający jest zwykle filtrem pasywnym RLC, który odpowiada za tłumienie zaburzeń emitowanych w badanym obwodzie lub wstrzykiwanych do tego obwodu w testach odporności. Tłumienie musi być skuteczne i ma zapewniać odpowiednie ograniczanie propagacji zaburzeń emitowanych lub wprowadzanych testowych w niepożądane fragmenty badanych obwodów.

Celowość analizy poznawczej CDN jest związana m.in. z obecnym brakiem konieczności wzorcowania tych struktur, co wynika z aktualnych dokumentów formalno-prawnych.

2. Sztuczne sieci pomiarowe (LISN)

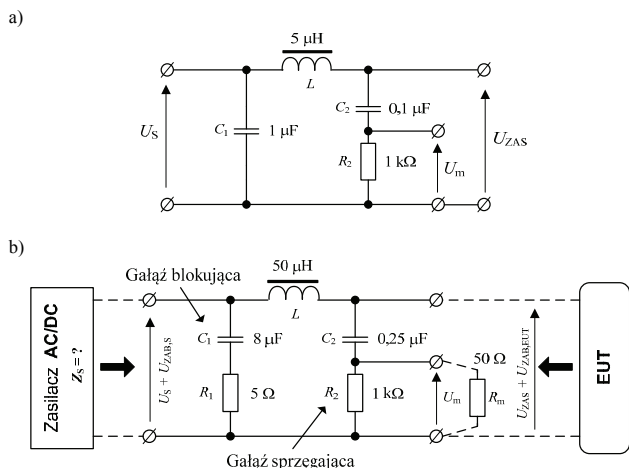
Sztuczne sieci pomiarowe (*ang. Line Impedance Stabilization Network*) są podstawowymi elementami składowymi torów przetwarzania w analizie zaburzeń przewodzonych. Topologie sieci są zależne od rodzaju zaburzeń, których poziomy muszą być mierzone i porównywane z wartościami dopuszczalnymi, określonymi przez normy w pomiarowym paśmie częstotliwości. W przypadku torów zasilających AC i DC, najczęściej analiza dotyczy zaburzeń wspólnych (asymetrycznych) lub rzadziej różnicowych (symetrycznych). Stąd różni się dwie podstawowe topologie LISN: Y oraz Δ . Zaburzenia asymetryczne są trudniejsze do odfiltrowania w realnych obwodach i ich poziomy mierzy się z użyciem sztucznych sieć, wykonanych w topologii Y.

Celem LISN jest wydzielenie zaburzeń wysokoczęstotliwościowych (w. cz.) od sygnału roboczego, (np. napięcia zasilającego) i wprowadzenie ich w postaci napięcia do odbiornika zaburzeń lub analizatora widma. Powyższą funkcję pełni obwód sprzężenia w sieci. Z uwagi na to, że zaburzenia zidentyfikowane w badanym torze mają pochodzić od zasilanego z tej linii badanego obiektu elektrycznego (EUT), to nie mogą się na nie nakładać inne rodzaje zaburzeń, pochodzące od strony źródła zasilania. Z drugiej strony, zaburzenia wstrzykiwane z EUT nie powinny trafiać do źródła zasilania. Obustronne tłumienie zapewnia obwód odsprzęgania, zmniejszający zaburzenia co najmniej o 10 dB w paśmie częstotliwości pomiarowej, dla którego przeznaczona jest LISN. Drugą, funkcją LISN jest dopasowanie impedancyjne dla EUT.

Na rys. 1 pokazano dwa przykłady struktur wewnętrznych sieci, stosowanych w badaniach urządzeń motoryzacyjnych i wojskowych. Oba obwody są podobne, jednak przeznaczone dla różnych pasm częstotliwości. Pomiary motoryzacyjne wykonuje się w przedziale 150 kHz ÷ 108 MHz [1], zaś pomiary emisji urządzeń montowanych w pojazdach wojskowych, w zakresie częstotliwości 10 kHz ÷ 10 MHz [2]. Analizy obliczeniowe i pomiarowe, skonstruowanych prototypów LISN, miały na celu m.in. określenie ich dokładności pomiarowych, a także wyznaczenie charakterystyk impedancji wyjściowych sieci.

W eksperymentach obliczeniowych stworzono modele matematyczne, opisujące równania przetwarzania LISN, na podstawie których można oszacować impedancje wyjściowe sieci oraz błędy pomiaru zaburzeń. Impedancja widziana z zacisków wyjściowych LISN jest parametrem, podawanym w specyfikacjach katalogowych. Wynika to z konieczności zapewnienia przez sztuczną sieć stałej impedancji „widzianej” od strony zasilania badanego obiektu (EUT). Impedancja uwzględnia wszystkie elementy składowe sieci, w tym powinna uwzględniać impedancję sieci zasilającej Z_s i impedancję lub rezystancję wejściową miernika zaburzeń R_m . Wykazano, że wpływ impedancji sieci zasilającej Z_s na impedan-

cję wyjściową LISN jest pomijalny, dlatego w niektórych analizach impedancja Z_s nie jest brana pod uwagę.



Rys. 1. a) Sztuczna sieć stosowana w motoryzacji [1]; b) Sztuczna sieć stosowana w badaniach urządzeń pojazdów wojskowych [2]
 Fig. 1. a) Line impedance stabilization network for automotive tests; b) Line impedance stabilization network for tests of military vehicle devices

Przykładową analizę metrologiczną, przeprowadzono dla sieci wykonanych przez autora, zgodnych z [2] i dedykowanych dla obwodów zasilających AC lub DC. Struktura obu identycznych, jedнопроводовых LISN, odpowiada schematowi z rys. 1b. Widok prototypowych sieci, prezentuje rys. 2.

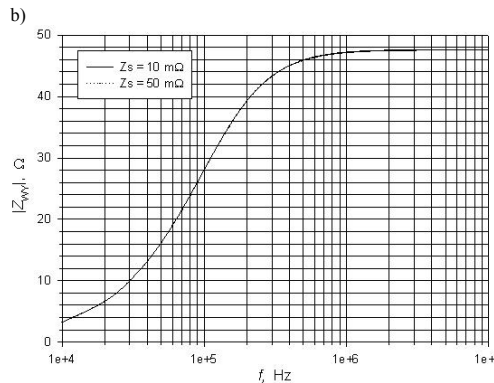
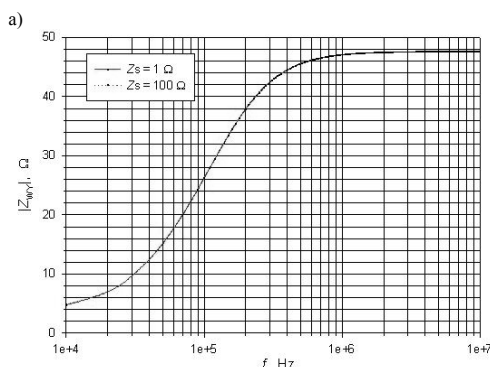


Rys. 2. Sztuczne sieci pomiarowe zgodne z wytycznymi zawartymi w normie [2]
 Fig. 2. Line impedance stabilization networks compatible with the standard [2]

Impedancja wyjściowa Z_{wy} , opisana jest zależnością, uwzględniającą elementy widoczne na rys. 1b:

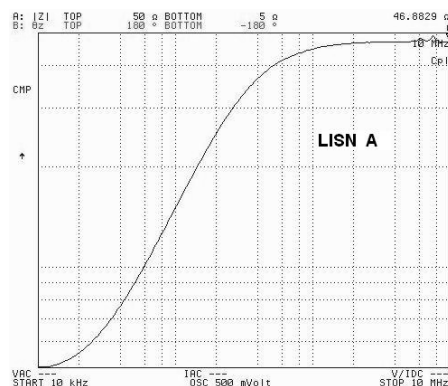
$$Z_{wy} = \frac{\left[\frac{Z_s \cdot \left(R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \right)}{Z_s + R_1 - j \frac{1}{\omega C_1}} + j\omega L \right] \cdot \left(\frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m} - j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{Z_s \cdot \left(R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \right) + j\omega L + \frac{R_2 \cdot R_m}{R_2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

Na rys. 3 pokazano przykładową charakterystykę zmian modułu impedancji Z_{wy} dla pojedynczej LISN.



Rys. 3. a) Impedancja wyjściowa dla zasilania AC; b) Impedancja wyjściowa dla zasilania DC (akumulatorowe źródło zasilania)
 Fig. 3. a) output impedance for AC source; b) output impedance for DC source (accumulator power supply)

Wpływ Z_s na krzywą impedancji jest pomijalny, więc analizę można uprościć. Na rys. 4 pokazano przykładowy wynik weryfikacji pomiarowej wykonanej analizatorem impedancji dla sieci A, bez uwzględnienia impedancji Z_s oraz R_m .



Rys. 4. Weryfikacja pomiarowa impedancji wyjściowej LISN (rys. 1b)
 Fig. 4. Measurements of the output impedance for LISN (Fig. 1b)

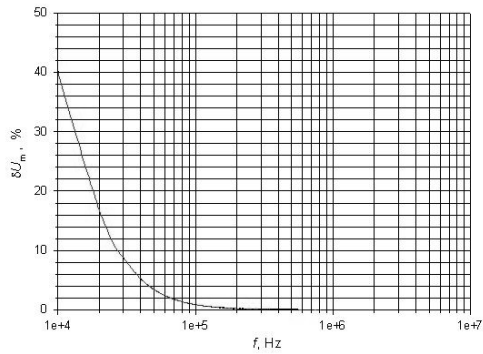
Pomiary laboratoryjne Z_{wy} nowo wykonanych LISN mają dodatkowo na celu sprawdzenie, czy w paśmie analizy nie pojawiają się np. niekorzystne zjawiska rezonansu, które wynikałyby z niewłaściwie wykonanych połączeń wewnętrznych oraz czy tolerancja impedancji mieści się w wymaganym przedziale 20%.

Na podstawie analizy teoretycznej można wyznaczyć dla LISN zależność określającą względny błąd pomiaru napięcia zaburzającego:

$$\delta U_m = \left[\frac{\frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m}}{\frac{R_2 \cdot R_m}{R_2 + R_m} - j \frac{1}{\omega C_2}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Powyższa zależność nie uwzględnia wpływu przewodów doprowadzających do badanego urządzenia, co jest uzasadnione tym, że przewody te dla większości EUT stanowią integralną całość. Graficzną prezentację zmian błędów pokazuje rys. 5.

Analizy LISN potwierdzają występowanie znacznych błędów pomiarowych dla dolnego zakresu częstotliwości. Zgodnie z CISPR 16-1, LISN powinny się charakteryzować spadkiem napięcia na strukturze mniejszym niż 5% znamionowego napięcia zasilającego U_S . Badania potwierdzają duży wpływ parametrów LISN na wyniki pomiarów poziomów zaburzeń przewodzonych i dowodzą, że sztuczne sieci stanowią istotny element toru pomiarowego [3].

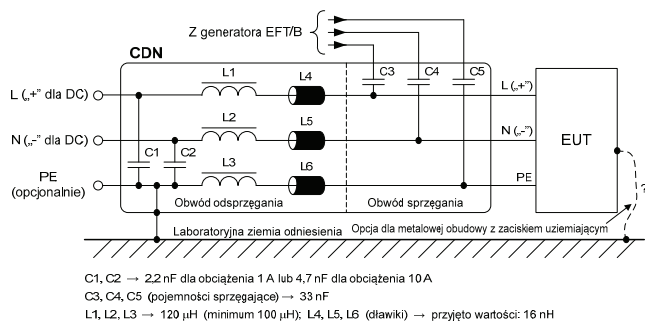


Rys. 5. Względny błąd pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych
Fig. 5. The relative measurement error of electromagnetic disturbances

3. Sieci CDN stosowane w testach odporności na zaburzenia przewodzone

Osobna grupa obwodów sprzęgania i tłumienia zaburzeń jest stosowana w testach odporności na zaburzenia przewodzone. Zaburzenia przewodzone, wprowadzane do przewodów zasilających, interfejsowych i sygnałowych EUT, mogą mieć charakter przepięć lub innych zmodulowanych sygnałów elektrycznych, których parametry są opisane w odpowiednich normach ogólnych i przedmiotowych. Niniejszy artykuł porusza wyłącznie problematykę badań odporności na sygnały przepięciowe, wstrzykiwane do linii zasilających AC i DC oraz do przewodów sygnałowych. W ramach powyższych badań, urządzenia poddawane są testom odporności na szybkie elektryczne stany przejściowe EFT/Burst oraz na udary typu SURGE.

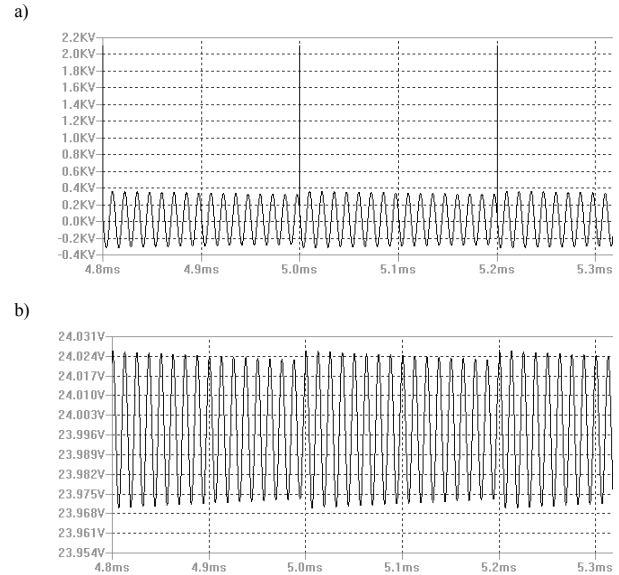
Szybkie elektryczne stany przejściowe BURST są paczkami krótkotrwałych impulsów przepięciowych, wstrzykiwanych asymetrycznie do przewodów (*laboratoryjna ziemia odniesienia* ↔ *linia/kilka linii jednocześnie*). Parametry amplitudowo-czasowe zaburzenia opisuje PN-EN 61000-4-4. Poziomy probiercze (ostrość badań) sięgają dla torów zasilających 4 kV, zaś dla linii sygnałowych 2 kV. W przypadku sprzęgania generatora z obwodami zasilania, moduł CDN wykonany jest zwykle jako struktura wewnętrzna generatora. Widok typowego obwodu CDN pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Znormalizowana struktura sieci sprzęgająco-odsprzęgającej dla linii zasilających AC lub DC
Fig. 6. Standard structure of the coupling-decoupling network for AC or DC power lines

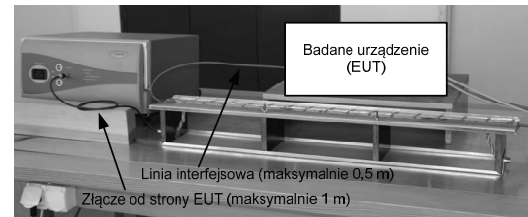
Obwód sprzęgania powinien zapewniać przede wszystkim powtarzalność badań, zaś część odsprzęgająca sieci, ma skutecznie tłumić zaburzenia propagowane w kierunku sieci zasilającej, co potwierdzono badaniami symulacyjnymi dla CDN z rys. 6 [4]. Przykładowy wynik analizy wykonanej w oprogramowaniu LTSpice, prezentuje rys. 7.

Widoczne na rys. 7 oscylacje mogą wynikać z obecności przypadkowych obwodów rezonansowych, które powstają w wyniku pasożytniczych pojemności i indukcyjności połączeń lub są efektem realnych parametrów obwodów wewnętrznych EUT.



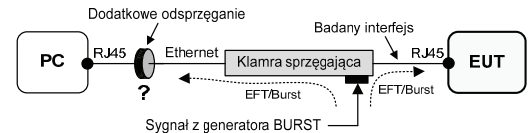
Rys. 7. a) Przebieg napięcia na zaciskach: „+”, „-”, PE obiektu EUT dla poziomu probierczego + 2 kV; b) przebieg napięcia na zacisku „+” źródła zasilania 24 VDC
Fig. 7. a) voltage at terminals „+”, „-”, PE of EUT for test level + 2 kV; b) voltage at terminal „+” of source 24 VDC

W przypadku konieczności wprowadzenia zaburzenia do linii interfejsowych lub sygnałowych, koniecznym jest wykorzystanie zewnętrznego sprzęgacza np. w postaci pojemnościowej klamry sprzęgającej. Widok klamry wykonanej przez autora, zgodnej z zaleceniami konstrukcyjnymi PN-EN 61000-4-4, pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Widok pojemnościowej klamry sprzęgającej BURST [4]
Fig. 8. Photo of the capacitive coupling BURST clamp [4]

Pojemność sprzęgająca klamry jest rzędu 50÷200 pF i zależy od parametrów dielektryka przewodu zaciśniętego w klamrze. Efektem ubocznym powyższego sprzęgania jest propagacja zaburzenia w obie strony przewodu interfejsowego, zgodnie z rys. 9.

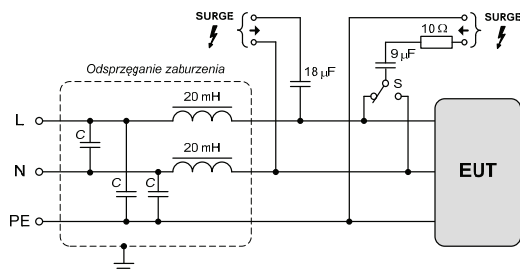


Rys. 9. Wprowadzanie zaburzenia BURST do linii interfejsowej Ethernet
Fig. 9. Injecting a BURST disturbance into the Ethernet interface

Rozwiązaniem zalecanym podczas testów jest implementacja klamry ferrytowej w niepożądaną część linii interfejsowej, która jest filtrem skutecznie tłumiącym zaburzenia wspólne. Nie ma jednak pewności, czy podczas testów klamra dostatecznie stłumi zaburzenia wprowadzane do karty sieciowej PC (rys. 9). Sytuacja taka budzi wątpliwości podczas oceny EUT w przypadku negatywnych wyników testów. Nie można jednoznacznie stwierdzić, czy za utratę transmisji odpowiada infrastruktura elektroniczna EUT, czy komputer PC, który nie powinien reagować na zaburzenia testowe.

Drugi rodzaj badań odporności z zakresu testów wysokonapięciowych, wykorzystuje generatory udarów SURGE, które wytwarzają dużą energię, niejednokrotnie wystarczającą do destrukcji EUT, które nie spełniają wymaganych kryteriów odporności.

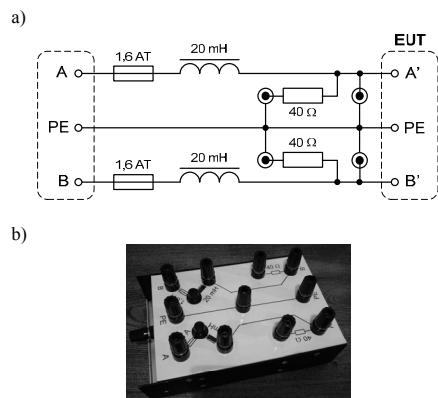
Generatory mogą wprowadzać zaburzenia do linii zasilających AC i DC, jak również do linii sygnałowych oraz interfejsowych. Podobnie jak w przypadku BURST, dla linii zasilających, obwody CDN wchodzą zwykle w strukturę wewnętrzną generatora, zaś w testach interfejsów, należy używać dedykowanych zewnętrznych CDN. Widok typowego obwodu CDN, zgodnego z PN-EN 61000-4-5, dedykowanego do badań linii zasilających AC lub opcjonalnie DC (L → +; N → -), prezentuje rys. 10.



Rys. 10. Struktura obwodu CDN do testów SURGE w liniach zasilających
Fig. 10. Diagram of the CDN circuit for SURGE tests in power supply lines

Wartości pojemności kondensatorów odsprężających C , widocznych na rys. 10 są dobierane podobnie jak w przypadku filtrów sieciowych, tj. z uwzględnieniem wymogów bezpieczeństwa. Stąd kondensatory muszą należeć odpowiednio do klasy X oraz Y. Równie istotne w realizacji praktycznej są indukcyjności, mające duże wartości i często zaleca się ich wykonanie jako szeregowo połączenie kilku dławików, co zmniejsza wartości międzyzwojowych pojemności pasywnych. Parametry pasywnicze elementów CDN mogą powodować rezonanse, lecz te zjawiska są bardziej istotne w układach CDN dedykowanych do wprowadzania w linie zaburzeń o charakterze zmodulowanych sygnałów o częstotliwościach radiowych (RF). W przypadku testów wysokonapięciowych, istotniejsze znaczenie ma wytrzymałość podzespołów na udary z zapewnieniem dużej skuteczności filtra obwodu odsprężania, który ma służyć tłumieniu zaburzenia w szerokim paśmie częstotliwości, sięgającym w przypadku BURST częstotliwości rzędu 100 MHz.

W przypadku konieczności wykonania testów odporności na udary SURGE, interfejsów, portów sygnałowych lub sterujących, należy użyć zewnętrznych układów CDN. Strukturę przykładowego układu oraz widok wykonanego przez autora prototypu, pokazano na rys. 11. Niniejszy CDN dedykowany jest głównie do testów linii asymetrycznych, w tym również linii telekomunikacyjnych, pracujących w opcji asymetrycznej.

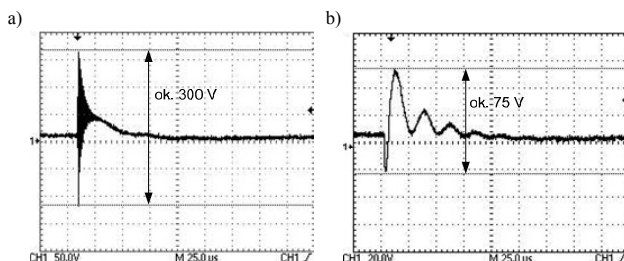


Rys. 11. Przykładowy obwód CDN do testów na zaburzenia SURGE w liniach interfejsowych i sygnałowych

Fig. 11. Exemplary CDN circuit for tests against SURGE disturbances in interface and signal lines

Celem poprawnej realizacji testów, wymaga się użycia dodatkowej pojemności sprzęgającej, włączanej szeregowo w obwód wyjścia Hi generatora SURGE. Wartość pojemności dla sprzężenia symetrycznego między liniami A^+B^- (rys. 11), wynosi $0,5 \mu\text{F}$.

W tym przypadku zacisk Hi generatora udarów musi być dołączony przez powyższą pojemność np. do rezystora 40Ω linii A^+ , zaś zacisk Lo, bezpośrednio do linii B^- . Może być również zrealizowana konfiguracja odwrotna. Na rys. 12 pokazano przykładowe przebiegi czasowe zaburzeń zarejestrowanych na zaciskach EUT (A^+B^-) oraz na zaciskach po stronie odsprężonej CDN ($A-B$), podczas wprowadzenia udaru SURGE o wartości $+500 \text{ V}$ między liniami (symetrycznie). Niniejszy przykład jest jednym z wyników uzyskanych podczas badań linii sterującej wskaźnikiem optycznym LED.



Rys. 12. Test SURGE, poziom $+500 \text{ V}$ między liniami (symetrycznie):

a) zaburzenie na zaciskach A^+B^- ; b) zaburzenie na zaciskach $A-B$

Fig. 12. SURGE, level $+500 \text{ V}$ between lines (symmetrical): a) disturbance at the terminals A^+B^- ; b) disturbance at the terminals $A-B$

4. Wnioski

Powyższe badania struktur CDN miały na celu poznanie rzeczywistej skuteczności ich działania, zważywszy, że duża ilość takich układów jest wykonywana samodzielnie m.in. przez jednostki naukowo-badawcze. W przypadku CDN, dedykowanych do badań odporności na zaburzenia napięciowe, nie analizowano parametrów impedancyjnych tych sieci w funkcji częstotliwości. Tego typu badania są wskazane w sieciach CDN przeznaczonych do testów odporności na zaburzenia o częstotliwości radiowej [5].

Analizy symulacyjne struktur sprzęgająco-odsprężających, należy wykonywać w sposób przemyślany, tak aby jak najlepiej odwzorować sytuację rzeczywistą. W tym przypadku, jako źródło zaburzeń w modelu symulacyjnym, należy stworzyć standardowy obwód generatora np. BURST lub SURGE. Wytwarzanie przebiegów zaburzających jako arbitralne złożenie innych kształtów zawartych w bibliotekach symulatora, może zniekształcać obraz sytuacji jaka ma miejsce w rzeczywistości.

Wykonane badania CDN ujawniają pewne ich niedoskonałości, m.in. rzeczywiste parametry odsprężania lub np. pojawiające się rezonanse, będące wynikiem parametrów pasywnych obwodów, charakteru odbiornika (EUT), a także długości kabli doprowadzających zaburzenia do CDN. Wykonujący badania powinien zdawać sobie sprawę z powyższych kwestii, ustalając wynik danego testu, który powinien być wiarygodny i powtarzalny.

5. Literatura

- [1] Polska Norma PN-EN 55025:2009E „Pojazdy samochodowe, łodzie i urządzenia napędzane silnikami spalania wewnętrznego. Charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych. Dopuszczalne poziomy i metody pomiarów w odniesieniu do ochrony urządzeń pokładowych”.
- [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] Ruszel P.: Sieć sztuczna elementem toru pomiarowego. PAK, vol. 53, s. 25-28, nr 10/2007.
- [4] Gonszc D.: Testy odporności urządzeń na szybkie elektryczne stany przejściowe EFT/B. PAK, vol. 58, s. 805-808, nr 9/2012.
- [5] Ruszel P.: Układy sprzęgające stosowane w procedurach badania odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone. PAK, s. 22-25, nr 1/2000.