

**Damian GONSCZ**

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

**Testy odporności urządzeń na szybkie elektryczne stany przejściowe EFT/B**

Dr inż. Damian GONSCZ

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



e-mail: damian.gonscz@polsl.pl

**Streszczenie**

Praca dotyczy aspektów technicznych badań odporności urządzeń elektronicznych na zaburzenia przepięciowe typu BURST. Scharakteryzowano procedurę badań oraz wymaganą aparaturę laboratoryjną. Wykonano analizy symulacyjne układów sieci sprzęgająco-odsprzęgających, celem zbadania ich skuteczności w zakresie poprawności działania obwodów odsprzęgania oraz w celu poznania ich parametrów metrologicznych.

**Słowa kluczowe:** kompatybilność elektromagnetyczna, testy odporności, sieci sprzęgająco-odsprzęgające.

**Device immunity tests against electrical fast transient EFT/B****Abstract**

The paper deals with the technical aspects of immunity tests of electronic devices against electrical fast transient (BURST). The setup of standard laboratory stand and a basic parameters of instruments are presented in paper (§2). The test procedures are described in chapter 3. The required test levels for AC and DC power lines and for interface or signal lines are shown in the Table 1. A construction of BURST clamp is presented in the Fig. 3. This clamp is made by the author of paper. The effectiveness and main properties (metrology parameters) of decoupling circuits of coupling-decoupling networks are analyzed (§4). One of typical structure of coupling-decoupling network (CDN) is characterized in this chapter. The diagram of analyzed CDN is shown in the Fig. 4. Research range embrace computer simulations. The voltage courses on terminal „+”, „-”, PE of EUT for test level  $\pm 2$  kV and a voltage courses on terminal „+” of source 24 VDC are presented in the Fig. 5 and Fig. 6. These courses are examples of carried analyses. Conclusions and the most important practical hints are pointed (§5). The research confirms efficiency of decoupling circuits for standard coupling-decoupling networks. The some problems for tests with use of clamp coupling are explained. The problems with interpretation of immunity test results are discussed.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, immunity tests, coupling-decoupling networks.

**1. Wprowadzenie**

Badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) wyrobu, obejmują pomiary poziomów emisji promieniowanej i przewodzonej oraz testy odporności na modelowe zaburzenia promieniowane i przewodzone. Niniejsza publikacja dotyczy wyłącznie zagadnień, związanych z badaniami odporności urządzeń elektronicznych, zwanych dalej jako EUT (*ang. Equipment Under Test*) na zaburzenia o charakterze przepięć, wstrzykiwane do okablowania zasilającego, sygnałowego, sterującego lub interfejsowego. Badania te należą do grupy testów odporności na zaburzenia przewodzone. Dokumenty formalno-prawne (m.in. normy), dotyczące badań EMC, definiują szereg modelowych sygnałów zaburzających, spośród których na szczególną uwagę zasługują sygnały przepięciowe, wprowadzane w warunkach laboratoryjnych do okablowania EUT. Rozróżnia się modelowe zaburzenia przepię-

ciowe o dużej energii typu SURGE oraz zaburzenia przepięciowe o małej energii typu BURST, które definiowane są również jako tzw. szybkie elektryczne stany przejściowe, oznaczane skrótem EFT/B [1].

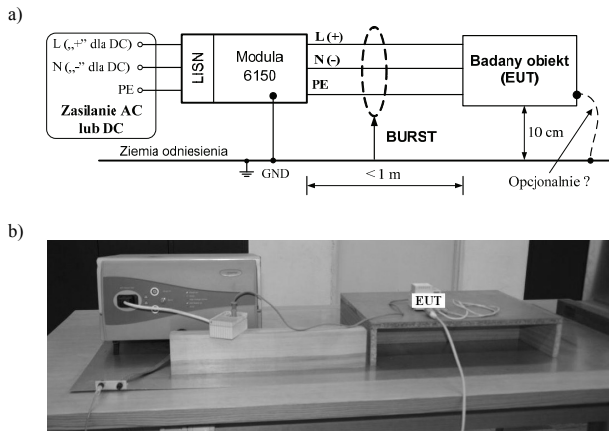
W związku z często otrzymywanymi negatywnymi wynikami testów prototypowych urządzeń elektronicznych na zaburzenia typu BURST, co wynika z doświadczeń praktycznych autora, w publikacji scharakteryzowano bardziej szczegółowo niniejszą problematykę badawczą.

W praktyce zaburzenia BURST pojawiają się z reguły w torach zasilania urządzeń. Zaburzenia są wynikiem procesów łączeniowych niektórych wielkopięciowych odbiorników o charakterze indukcyjnym i przeważnie pochodzą od drgań styków łączników mechanicznych, styczników oraz przekaźników. Analiza procesu rozłączania obwodów przewodzących znaczne prądy, potwierdza efekt wielokrotnego zrywania i ponownego zapalania się łuku elektrycznego na łączniku [2]. Proces ten wynika ze zjawisk fizycznych i zachodzi z dużą częstotliwością, co sprawia, że nie jest on zauważalny gołym okiem. Należy zaznaczyć, że rozwierane styki łącznika mogą być traktowane także jak zmienna pojemność włączona szeregowo w obwód roboczy np. o charakterze RL, co może skutkować pojawiającymi się licznymi rezonansami elektrycznymi w momencie komutacji i w efekcie może dawać dodatkowe zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, nie będące krotnościami częstotliwości podstawowej prądu roboczego. Obserwując proces komutacji, można jedynie zauważyć pozornie pojedynczy łuk elektryczny, jednak efekt jest rozpoznawalny jako seria szpilkowych przepięć, pojawiających się w liniach zasilających napięcia przemiennego lub stałego. Przepięcia takie mogą często zakłócić pracę innych wrażliwych urządzeń, zasilanych z tego samego toru, co skłania do laboratoryjnego badania odporności urządzeń na tego typu zaburzenie. Duża częstotliwość krótkotrwałych przepięć BURST o znacznych stromościach zbocza narastającego, sprawia, że łatwo wnikają one do obwodów wrażliwych urządzeń z racji często małej dynamiki filtrów i zastosowanych ograniczników przepięć, o ile takie zabezpieczenia w ogóle są zainstalowane w urządzeniu. Nieco inny efekt dają klasyczne zaburzenia typu SURGE, znane m.in. jako impuls napięciowy (udar) 1,2/50. W tym przypadku, z racji dużej energii, urządzenie może ulec uszkodzeniu, jednak mniejsze stromości zbocza impulsu i dłuższy czas jego trwania, sprawiają, że do pewnej wartości amplitudy impulsu, często zaburzenie nie jest zauważalne przez urządzenie. Warunkiem jest dobór odpowiednio skutecznych zabezpieczeń przeciwprzepięciowych i układów filtrujących.

**2. Laboratoryjne stanowisko badawcze**

Celem poprawnego oszacowania poziomu odporności EUT na testowe zaburzenia przepięciowe typu BURST, wprowadzane do obwodów elektrycznych urządzenia, należy stworzyć stanowisko badawcze, którego cechy i parametry są ściśle opisane w [1]. Stanowisko musi być złożone z generatora testowego z analogowym torem przetwarzania, najlepiej z wbudowanym, obwodem sprzęgająco-odsprzęgającym, przeznaczonym do sprzęgania sygnałów przepięciowych z liniami toru zasilania, pojemnościowej kłamy sprzęgającej przeznaczonej do testów dla linii sygnałowych, odpowiednio skonfigurowanego obwodu zasilania EUT oraz niezależnego systemu uziemiającego. Wymagane jest, aby wzajemne ustawienie przestrzenne elementów składowych stanowiska odpowiadało zaleceniom normy [1]. Na rys. 1 pokazano schemat blokowy toru przetwarzania (AC lub DC) oraz widok stanowiska laboratoryjnego, którego integralną część w tym przypadku stanowi generator Moduła 6150 firmy Schaffner. Generator zawiera wewnętrzne, znormalizowane obwody sprzęgania i odsprzęgania oraz umożliwia badania z użyciem zewnętrznych

klamer pojemnościowych, a także innych rozwiązań sprzęgających, stosowanych często w warunkach przemysłowych.



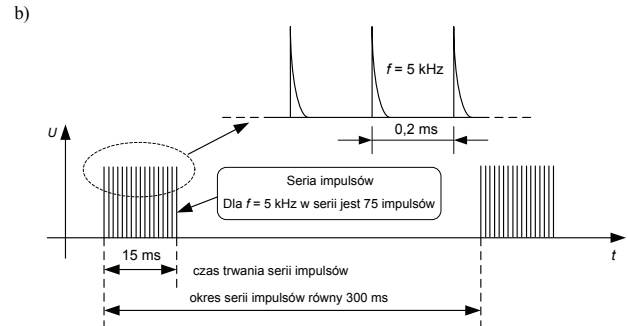
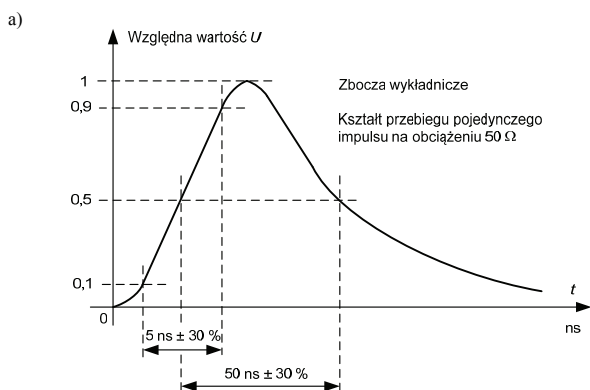
Rys. 1. a) Schemat blokowy toru przetwarzania; b) widok stanowiska laboratoryjnego do badań odporności

Fig. 1. a) The block diagram of the processing path; b) a photo of laboratory stand for immunity tests

### 3. Procedura wykonywania testów odporności

Badania należy przeprowadzić z wymaganymi poziomami probierczymi (tzw. wymaganą ostrością), opisanymi w normach przedmiotowych/produktu, stosowanych dla badanej grupy urządzeń. Podstawowy test, polega na wstrzyknięciu serii impulsów przepięciowych kolejno do każdego przewodu linii zasilającej lub do kilku wybranych (maksymalnie wszystkich) przewodów łącznie. Zaburzenie wprowadzane jest do przewodów za pomocą obwodu sprzęgającego, który zwykle stanowi wewnętrzną część składową każdego generatora. Przepięcie testowe wprowadzane jest między danym przewodem zasilania (kilkoma przewodami), a potencjałem lokalnej ziemi odniesienia (sprężenie asymetryczne). Dla linii zasilającej (L, N, PE) można wykonać maksymalnie 7 kombinacji sprzężenia. Porównując, zaburzenie typu SURGE, wprowadza się symetrycznie, czyli między poszczególnymi przewodami, bez wykorzystania ziemi odniesienia. Lokalna ziemia odniesienia wykonana jest z jednej blachy, położonej na nieprzewodzącym stole (rys. 1) i drugiej pod nim o wymiarach zgodnych z [1]. Blachy powinny wystawać poza EUT minimum 10 cm z każdej strony i być połączone galwanicznie z niezależnym uziemieniem. Jeżeli producent urządzenia zaleca w normalnych warunkach jego eksploatacji, wykonanie połączenia metalowej obudowy do potencjału ochronnego PE w przewidzianym do tego punkcie, to podczas testu punkt ten powinien być również połączony z metalową płytą.

Kształt pojedynczego impulsu typu BURST i sekwencję czasową impulsów o częstotliwości 5 kHz, formowanych w paczki, pokazano na rys. 2.



Rys. 2. a) Kształt pojedynczego impulsu typu BURST; b) sekwencja czasowa testu odporności dla częstotliwości 5 kHz

Fig. 2. a) The curve of single BURST pulse; b) a time sequence of immunity test for frequency 5 kHz

Procedura testu dla danego sprzężenia polega na wprowadzaniu do linii galwanicznie lub za pomocą rozłożonej pojemności sprzęgającej paczek impulsów (rys. 2) o polaryzacji dodatniej przez minutę i paczek ujemnych również przez czas jednej minuty. Poziomy probiercze i kryteria oceny urządzenia opisane są w normie ogólnej [1].

Tab. 1. Znormalizowane poziomy probiercze dla testów odporności na zaburzenia typu BURST [1]

Tab. 1. Standard levels for immunity tests against BURST disturbances [1]

Poziom testowy (ostrość)	Przyłącza zasilające wraz z przewodem PE		Przyłącza sygnałowe, interfejsowe i sterujące	
	Napięcie szczytowe [kV]	Częstotliwość [kHz]	Napięcie szczytowe [kV]	Częstotliwość [kHz]
1	0,5	5	0,25	5
2	1	5	0,5	5
3	2	5	1	5
4	4	2,5	2	5
x <sup>1)</sup>	Specjalny	Specjalny	Specjalny	Specjalny

1) - Poziomy probiercze „x” nie jest określony (może być sprecyzowany w wymaganiach technicznych wyrobu)

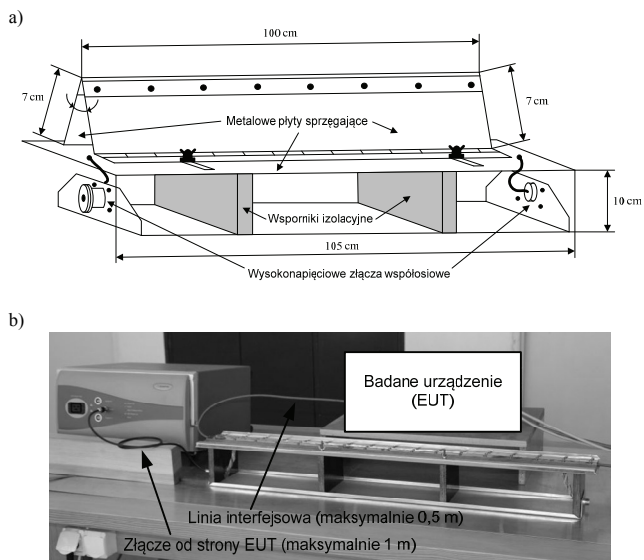
Dla danego urządzenia należy skorzystać z normy przedmiotowej/produktu, powołującej się na dany poziom probierczy testu i wskazującej wymagane kryterium odporności. Dla przykładu linia zasilająca AC urządzeń informatycznych, powinna być testowana poziomem 1 kV z zapewnieniem kryterium B (po ustaniu testu urządzenie wraca samoczynnie do poprawnej pracy). Inne kryteria są następujące: A – urządzenie nie reaguje na zaburzenie; C – urządzenie samoczynnie nie wraca do poprawnej pracy; D – urządzenie zostaje trwale uszkodzone lub skasowana zostaje zawartość pamięci.

Testy należy wykonywać od najniższego poziomu, aż do poziomu wymaganego dla danej grupy urządzeń i nie jest wymagana synchronizacja zaburzenia z przebiegiem roboczym (dotyczy linii AC). W większości badań wymaga się powtarzania impulsów z częstotliwością 5 kHz, choć badania wykonuje się również czasami dla częstotliwości większych np. 100 kHz.

Konstrukcję i widok wykonanej przez autora pojemnościowej klamry sprzęgającej pokazano na rys. 3. Rozłożona pojemność sprzęgająca klamry wynosi 50 ÷ 200 pF i zależy od parametrów kabla.

Istotnym zagadnieniem podczas testu z wykorzystaniem klamry jest fakt propagacji zaburzenia zarówno do EUT, jak i do urządzenia współpracującego z badanym interfejsem, np. PC. Brak obwodu odsprężania utrudnia jednoznaczną ocenę wyniku testu. Wobec powyższego, zaleca się korzystanie z układów CDN (ang. Coupling-Decoupling Network), które jednak nie nadają się do badań szybkich linii interfejsowych [3]. Inne rozwiązania w testach linii sygnałowych polegają na owijaniu kabla taśmą aluminiową lub np. na stosowaniu kondensatorów sprzęgających

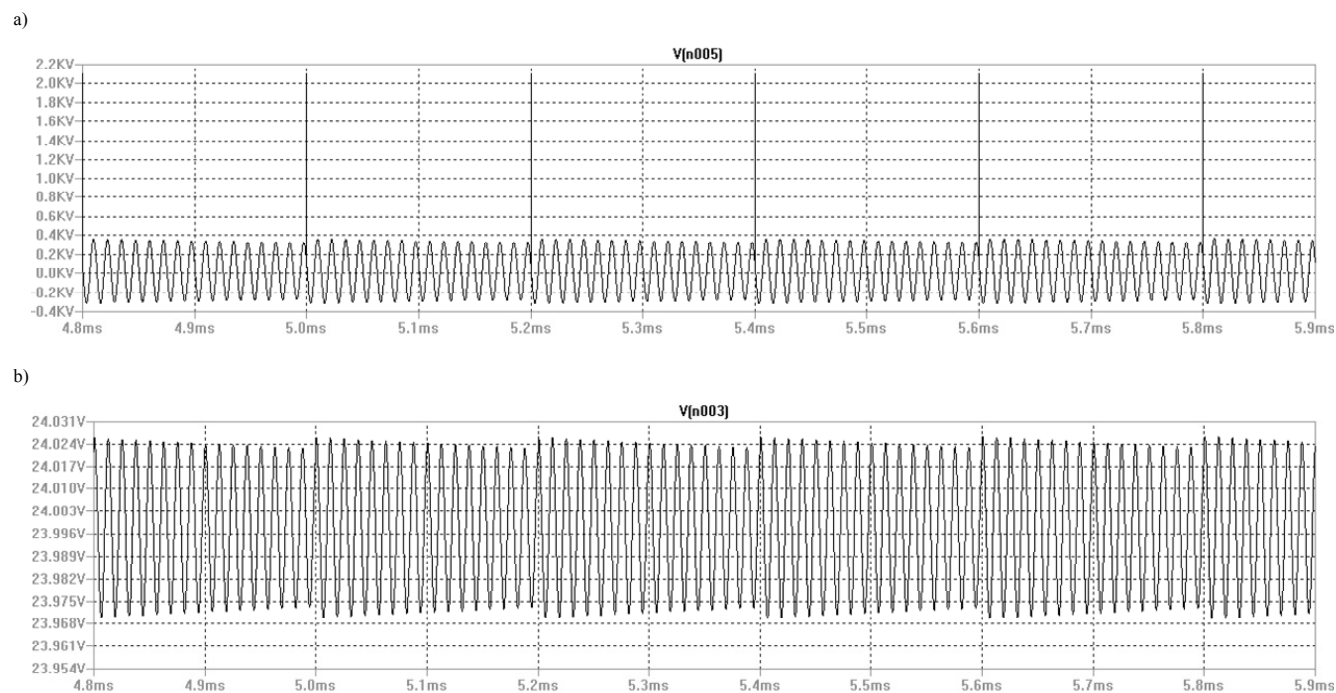
100 pF, wpinanych do kolejnych przewodów galwanicznie. Dowolność rozwiązań obwodów sprzęgania daje w efekcie zgrubną ocenę odporności badanego interfejsu. Dowolność jest konsekwencją aktualnego braku konieczności kalibracji układów CDN, wykorzystywanych w badaniach EMC.



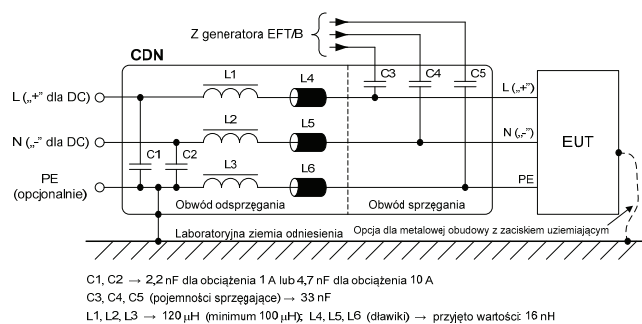
Rys. 3. a) Znormalizowane wymiary klamry [1]; b) widok klamry BURST  
Fig. 3. a) Standard dimensions of clamp [1]; b) a photo of BURST clamp

#### 4. Analiza sieci sprzęgająco-odsprzęgającej

W niniejszym punkcie przedstawiono wyniki przykładowej symulacji komputerowej, wykonanej dla standardowej struktury CDN [1]. Analiza miała na celu m.in. określenie skuteczności obwodu odsprzęgania. W analizie przyjęto zasilanie DC o napięciu znamionowym 24 V. Schemat ideowy przeanalizowanego w eksperymencie obwodu CDN, pokazano na rys. 4.



Rys. 5. a) Przebieg napięcia na zaciskach: „+”, „-”, PE obiektu EUT dla poziomu probierczego + 2 kV; b) przebieg napięcia na zacisku „+” źródła zasilania 24 VDC  
Fig. 5. a) Voltage course on terminal „+”, „-”, PE of EUT for test level + 2 kV; b) a voltage course on terminal „+” of source 24 VDC



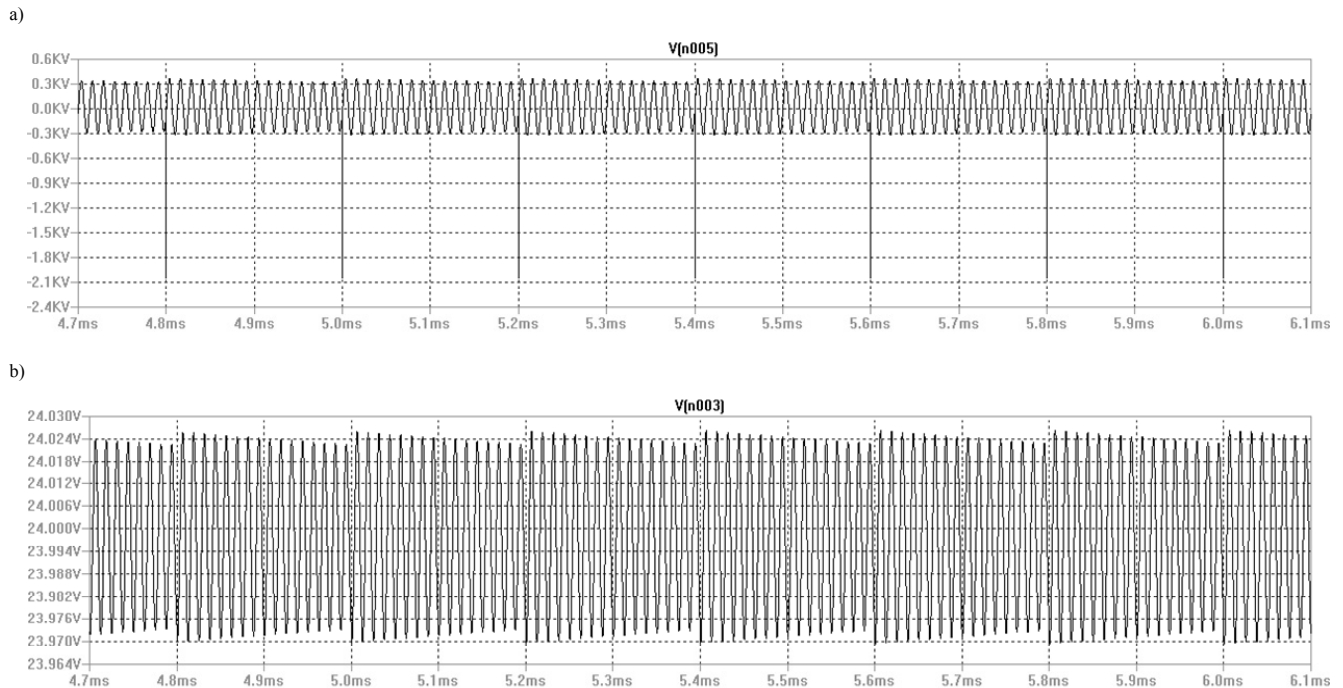
Rys. 4. Znormalizowana struktura sieci sprzęgająco-odsprzęgającej dla linii zasilających AC lub DC

Fig. 4. Standard structure of coupling-decoupling network for AC or DC power lines

Przyjęcie napięcia 24 VDC wynika z konieczności częstych badań w tej opcji zasilania, szczególnie urządzeń elektronicznych dla przemysłu, mających konstrukcję modułową, zwykle do montażu na szynie DIN. W analizie założono przykładowy odbiornik o charakterze RL i mocy około 10 W, w opcji z przewodem ochronnym. Konfiguracja sieci CDN dla powyższej mocy odbiornika, wymagała przyjęcia dla kondensatorów C1 i C2 wartości pojemności równej 2,2 nF.

Na rys. 5 i rys. 6 pokazano przebiegi czasowe, zarejestrowane na zaciskach: „+”, „-” i PE badanego obiektu (EUT) oraz przebieg zarejestrowany na wyjściu źródła zasilania 24 VDC (zacisk „+”), obrazujący pojawiające się tzw. napięcie reszkowe, będące wynikiem wstrzykiwanych prądów do struktury CDN.

W symulacji wprowadzono jednocześnie do linii: „+”, „-” i PE przebieg zaburzący, opisany na rys. 2. Przyjęto poziom ostrości 2 kV w polaryzacji dodatniej i ujemnej. Rozważenie takiego poziomu probierczego podyktowane jest wymaganiami norm dla wielu urządzeń, pracujących w środowisku przemysłowym oraz mających cechować się dużą odpornością na zaburzenia przepięciowe. Są to np. systemy alarmowe lub dozоровe.

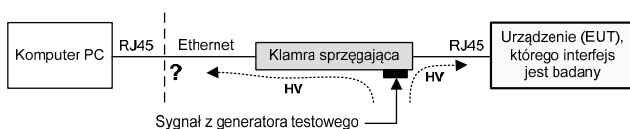


Rys. 6. a) Przebieg napięcia na zaciskach: „+”, „-”, PE obiektu EUT dla poziomu probierczego – 2 kV; b) przebieg napięcia na zacisku „+” źródła zasilania 24 VDC  
Fig. 6. a) Voltage course on terminal „+”, „-”, PE of EUT for test level – 2 kV; b) a voltage course on terminal „+” of source 24 VDC

## 5. Wnioski

Rozważając obszar aplikacyjny układów sprzęgających, sugeruje się raczej stosowanie rozwiązań w postaci układów, zawierających obwody odsprzęgania. Obwody takie skutecznie tłumią zaburzenia przepięciowe w kierunku źródła zasilania, czego potwierdzeniem jest przykładowa analiza, przeprowadzona w programie LTspice. Wadą takich rozwiązań jest jednak konieczność przecinania linii, do których wstrzykiwane są zaburzenia. Ma to szczególnie duże znaczenie w przypadku linii interfejsowych, gdzie powinno się stosować dodatkowo złącza wysokonapięciowe.

Pojemnościowa kłama sprzegająca propaguje zaś zaburzenia w obie strony, bez możliwości odsprzężenia, co utrudnia jednoznaczne ustalenie wyniku testu. Na rys. 7 pokazano drogi propagacji wysokonapięciowych zaburzeń (HV) dla testu odporności interfejsu Ethernet.



Rys. 7. Znormalizowana struktura sieci sprzęgająco-odsprzegającej dla linii zasilających AC lub DC

Fig. 7. Standard structure of coupling-decoupling network for AC or DC power lines

Celem odsprzężenia zaburzeń w kierunku komputera PC, w niektórych sytuacjach, na linii interfejsu między kłamrą BURST a PC, zakłada się np. kłamrę ferrytową, stanowiącą dosyć skuteczny dla BURST filtr zaburzeń wspólnych. Nie jest to jednak procedura związana z wymaganą konfiguracją stanowiska, a wynikająca z własnych doświadczeń badacza, mającego na celu jednoznaczną i poprawną ocenę wyniku przeprowadzonego testu.

Z uwagi na dużą stromość zbocza narastającego impulsu przepięciowego (rys. 2), widmo zaburzeń BURST jest szerokie. Zakłada się, że sięga do około 100 MHz, co należy uwzględnić wykonując doprowadzenia sygnału z generatora do kłamy. Sugeruje się wykonanie doprowadzeń (testowego i pomiarowego) licą, minimalizującą efekt naskórkowości.

Przeprowadzone analizy symulacyjne, z których dwa przykładowe wyniki pokazano na rys. 5 i 6, przybliżają pewne zjawiska, niezauważalne w czasie normalnych testów konkretnego urządzenia. Są to np. widoczne oscylacje napięcia o dużej częstotliwości i sporych amplitudach (rys. 5a i 6a), które wynikają z obecności elementów LC w sieci CDN, jak również w strukturze badanego urządzenia (w teście założono odbiornik jako szeregowe połączenie:  $R = 57 \Omega$  i  $L = 5 \text{ nH}$ ).

Istnienie oscylacji skłania do przemyśleń, czy np. negatywny wynik rzeczywistego testu odnosi się do impulsów 5 kHz, czy do sygnałów o wyższych częstotliwościach, wynikających z rezonansów. Również napięcie obserwowane na źródle zasilania 24 VDC jest zaburzone niewielką składową przemienną, stanowiącą napięcie resztkowe. Oscylacje i inne obserwowane podczas testów zakłócenia w napięciu zasilania, szczególnie po stronie wtórnej generatora, mogą w dużym stopniu zależeć od użytych struktur filtrów EMC w badanym obiekcie (EUT) oraz od rodzajów zaimplementowanych w nim ograniczników przepięć.

Ustalenie jednoznacznego wyniku opisanych powyżej testów nie jest łatwe, zwłaszcza, że dodatkowo wiele urządzeń poddanych badaniom nie jest konstrukcyjnie powtarzalnych w dalszej ich produkcji seryjnej. Niepowtarzalność wyniku często z minimalnie innego ułożenia wewnętrznych wiązek przewodów, co może znacząco wpływać na wyniki testów BURST.

## 6. Literatura

- [1] Polska Norma PN-EN 61000-4-4:2010 „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-4: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych. Podstawowa publikacja EMC”.
- [2] Machczyński W.: Wprowadzenie do kompatybilności elektromagnetycznej, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań, 2004.
- [3] Modrykamień G.: Projekt zmian w IEC 61000-4-5. Nowego rodzaju sieć sprzęgająco-odsprzegająca do badań odporności na SURGE w szerokopasmowych liniach sygnałowych, jak np. Ethernet 1 Gb/s, mat. konf. Warsztaty EMC, Wrocław, 2011.