

Piotr RUSZEL

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

## Układy sprzęgające stosowane w procedurach badania odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone

### Streszczenie

W artykule omówiono układy sprzęgające stosowane w badaniach odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone oraz podano podstawowe informacje dotyczące ich konstrukcji.

### Abstract

Coupling/decoupling networks applicable to conducted immunity tests of the electronic equipments are discussed in this publication, and some basic information on them design are given.

### Wstęp

Badanie odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone jest jednym z elementów testu określającego właściwości tego urządzenia z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej (KEM) [1], [2]. Procedura tych badań podana jest w przepisach normalizacyjnych IEC 1000-4-6 oraz w dokumencie EN 50141 komitetu zajmującego się normalizacją w krajach Unii Europejskiej (CENELEC - Comite European de Normalisation Electrotechnique). Podstawowy zakres częstotliwości w którym wymienione badania należy wykonać oraz wymagane poziomy sygnału stosowanego do testu zestawiono w tabeli 1. Zakres częstotliwości  $9 \text{ kHz} \div 0,15 \text{ MHz}$  może zostać pominięty (§5 IEC 1000-4-6) jak również w przypadku małych urządzeń górna częstotliwość graniczna testu może zostać przesunięta do częstotliwości 230 MHz (aneks A do IEC 1000-4-6). Wielkość urządzenia w tym przypadku określana jest przez porównanie jego największego wymiaru liniowego  $l$  z jedną czwartą długości fali elektromagnetycznej w wolnej przestrzeni przy częstotliwości  $f = 80 \text{ MHz}$ . W przypadku małych urządzeń o zasilaniu bateryjnym dolną częstotliwość testu można zwiększyć powyżej  $f_{\text{start}} = 150 \text{ kHz}$ , i określa się ją w takim przypadku z zależności:

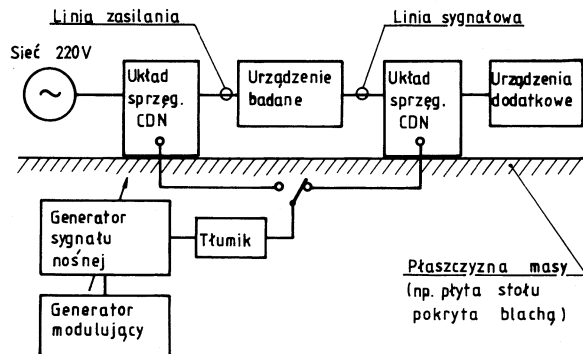
$$f_{\text{start}} = \frac{C_0}{10l} \quad (1)$$

gdzie:  $C_0$  - prędkość światła w próżni  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$   
 $l$  - największy wymiar liniowy badanego urządzenia.

**Tabela 1.** Zestawienie obowiązujących według EN 50141 poziomów sygnałów testowych w zakresie częstotliwości 0,15 - 80 MHz

Zakres częstotliwości pomiarów 0.15 → 80 MHz				
Poziom Testu	Wartość sygnału Stosowanego do testu		Urządzenia stosowane w środowisku elektromagnetycznym	
	[V]	[dB μV]	Grupa	Cechy środowiska
1	1	120	Klasa 1 – mały poziom zakłóceń elektromagnetycznych	
2	3	130	Klasa 2 – średni poziom zakłóceń elektromagnetycznych	
3	10	140	Klasa 3 – duży poziom zakłóceń elektromagnetycznych	
S	Ustalany indywidualnie		Klasa S – indywidualnie ustalany poziom zakłóceń elektromagnetycznych	

Sygnał stosowany do realizacji testu jest sygnałem sinusoidalnym modulowanym amplitudowo częstotliwością  $1 \text{ kHz} \pm 10\%$  o głębokości modulacji  $80\% \pm 5\%$ . Poziom harmonicznych i innych sygnałów niepożądanych co najmniej - 15 dB względem poziomu nośnej sygnału testowego.



**Rys. 1.** Układ pomiarowy umożliwiający wykonanie podstawowego testu określającego odporność urządzenia badanego na zakłócenia przewodzone. Pod znaczeniem „urządzenia dodatkowe” należy rozumieć sprzęt niezbędny do tego aby badane urządzenie funkcjonowało w swoich normalnych warunkach pracy

Jednak jako podstawowy zakres częstotliwościowy badań odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone przyjmuje się zakres  $0,15 \div 80 \text{ MHz}$ , a układ w którym jest on realizowany przedstawiono na rys. 1. Wobec powyższego, rozważania podane w dalszej części publikacji dotyczą podstawowego zakresu częstotliwości, w którym wykonywane są pomiary.

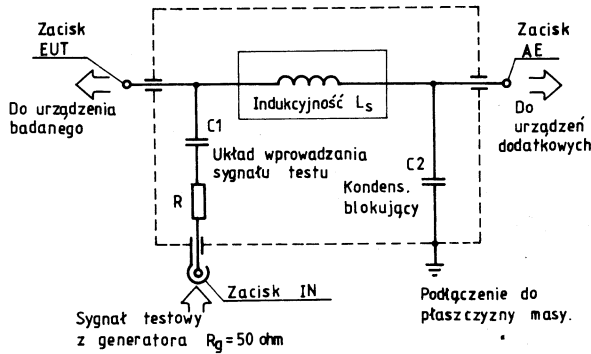
Za podstawowe zakłócenia przewodzone uważa się sygnały indukowane we wszelkiego rodzaju połączeniach przewodowych przez zmienne pola elektromagnetyczne o częstotliwościach radiowych. Te zmienne pola elektromagnetyczne generują w połączeniach przewodowych prądy zakłóceń o charakterze sygnałów wspólnych (common mode signal). Sygnały te, wnikając w strukturę układu elektronicznego, mogą powodować degradację jego funkcjonowania. Realizacja testu polega zatem na zamierzonym (celowym) wprowadzeniu do wyżej wymienionych połączeń sygnałów testowych, o określonych poziomach i kontroli jakości funkcjonowania badanego urządzenia. Wprowadzenie wspomnianego sygnału testowego umożliwiają tak zwane układy sprzęgające (Coupling/Decoupling Network - CDN).

### Układy sprzęgające (układy CDN)

Podstawowym zadaniem układu sprzęgającego jest wprowadzenie sygnału testowego do urządzenia badanego za pośrednictwem istniejącego zewnętrznego połączenia przewodowego oraz jednocześnie separacja pozostałych urządzeń (urządzeń dodatkowych) dołączonych do tej linii od sygnału stosowanego do testowania. Umożliwia to układ sieci elektrycznej, której podstawową strukturę przedstawia rys. 2.

W ogólnym przypadku zewnętrzne połączenia galwaniczne związane z funkcjonującym testowanym urządzeniem służą do:

- zasilania badanego urządzenia z sieci energetycznej (220/110V, 50/60Hz),



Rys. 2. Uproszczony schemat sieci elektrycznej pełniącej rolę układu sprzęgającego. Gdzie:  
 EUT – zacisk do podłączenia urządzenia testowanego (Equipment Under Test),  
 AE – zacisk do podłączenia urządzenia dodatkowego (Auxiliary Equipment),  
 IN – zacisk do podłączenia generatora sygnału testu (Injection)

- przesyłania sygnałów niosących informację lub sygnałów sterowania (np. linie RS),
- przesyłania sygnałów mierzonych (linie sygnałowe).

Pod względem konstrukcyjnym linie łączące urządzenia można podzielić na:

- nie ekranowane linie symetryczne,
- nie ekranowane linie niesymetryczne,
- jedno, dwu i trzy przewodowe linie zasilania,
- połączenia ekranowane.

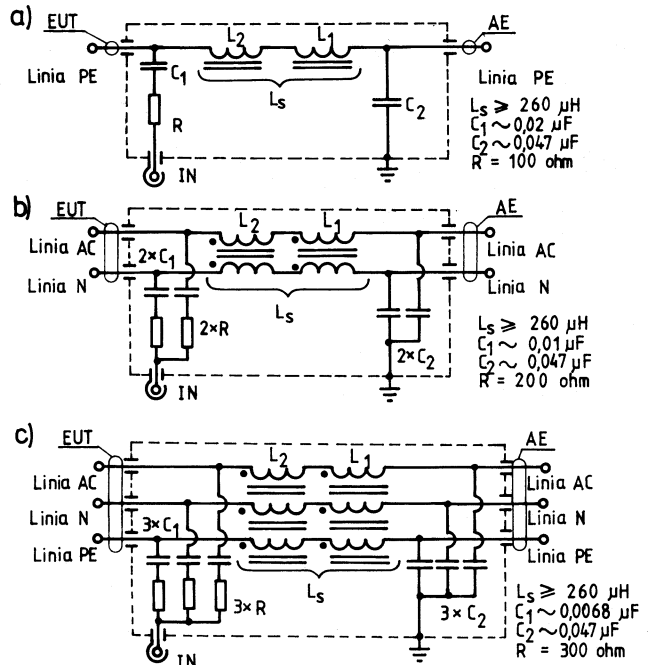
Szczególnie wrażliwe na indukowanie prądów zakłóceń o częstotliwościach radiowych są trzy pierwsze z czterech wyżej wymienionych rodzajów linii. Są to linie nie ekranowane. Ze względu na specyfikę konstrukcyjną linii i jej przeznaczenie, wymagają one odrębnych układów sprzęgających (tabela 2), jakkolwiek ich podstawowa struktura odpowiada schematowi podanemu na rys. 2. W strukturze tej, impedancję zaporową dla składowej zakłóceń stanowią z reguły szeregowo połączone dwie indukcyjności. Łączna wartość szeregowo połączonych indukcyjności  $L_s \approx 260 \mu\text{H}$  i jest ona niezbędna do zapewnienia wymaganej wartości impedancji

Tabela 2. Zestawienie rodzajów układów sprzęgających niezbędnych do realizacji testów badania odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone według wymagań IEC 1000-4-6 (dotyczy linii nie ekranowanych)

Rodzaj linii / Obszar Zastosowania	Zasilanie z sieci energetycznej nie ekranowanej			Linie symetryczne nie ekranowane			Linie niesymetryczne nie ekranowane
	Jedna linia	Dwie linie	Trzy linie	Jedna para	Dwie pary	Cztery pary	
Testowanie linii zasilających urządzenie z sieci 220/110 V 50/60 Hz	CDN-M1	CDN-M2	CDN-M3	-----			-----
Testowanie linii przesyłania danych np. linie telekomunikacyjne.	-----			CDN-T2	CDN-T4	CDN-T8	-----
Testowanie linii sygnałowych	-----			-----			CDN - AF2

Tabela 3. Dopuszczalne graniczne wartości impedancji wejścia EUT układu sprzęgającego, przy wejściu AE rozwartym i zwartym z płaszczyzną masy

Impedancja wejścia EUT	Zakres częstotliwości [MHz]	
	0.15 → 26	26 → 80
Maksymalna wartość [Ω]	170	210
Nominalna wartość [Ω]	150	150
Minimalna wartość [Ω]	130	105



Rys. 3. Schematy ideowe układów sprzęgających stosowanych w przypadku nie ekranowanych linii zasilania sieciowego:

- układ sprzęgający CDN - M1,
- układ sprzęgający CDN - M2,
- układ sprzęgający CDN - M3

(tabela 3) układu sprzęgającego, określonej od strony zacisku służącego do podłączenia urządzenia testowanego (zacisk EUT, Equipment Under Test). Kondensator blokujący  $C_2$  włączony od zacisku AE (Auxiliary Equipment) do płaszczyzny masy, ma zapewnić dodatkowe zwarcie do masy, dla tej części sygnału stosowanego do testowania, która przeniknie przez dławik  $L_s$ . Wprowadzenie sygnału testowego do linii przewodowej odbywa się poprzez układ złożony z szeregowo połączonych elementów; oporności  $R$  i pojemności  $C_1$ , a w przypadku układów stosowanych do linii symetrycznych dodatkowo jeszcze przez transformator symetryzujący. Impedancja na zacisku IN (Injection) powinna zapewnić dopasowanie do impedancji wejściowej generatora dostarczającego sygnał stosowany do testowania ( $R_g = 50 \text{ ohm}$ ).

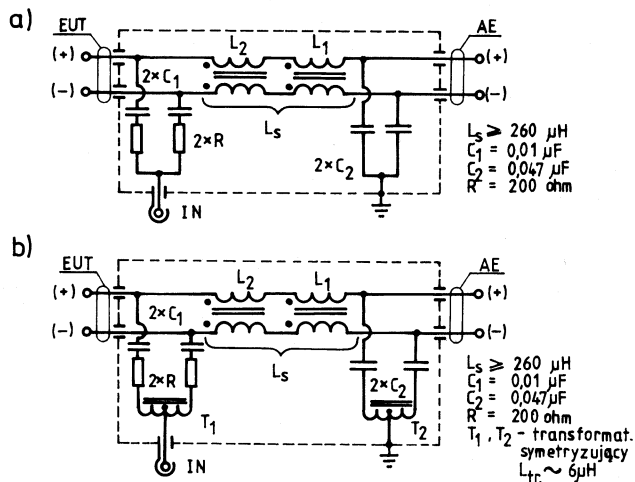
### Układ sprzęgający dla nie ekranowanych linii zasilania sieciowego (CDN-M)

Sieć jednofazowa może składać się z następujących trzech linii; linii fazowej (linia AC), linii neutralnej (linia N) i linii zera bezpiecznego (linia PE). Sygnał testujący doprowadzany jest do każdej z tych linii, a schematy ideowe stosowanych do tego celu układów sprzęgających podano na rys. 3, odpowiednio dla linii jedno- dwu i trzy przewodowej.

### Układy sprzęgające dla nie ekranowanych linii sygnałowych i linii sterowania (linie CDN-T, CDN-AF)

Nie ekranowane linie sygnałowe i linie sterowania mogą być wykonane jako symetryczne bądź jako niesymetryczne. Stosowane w obu przypadkach układy sprzęgające różnią się sposobem załączenia kondensatorów

blokujących  $C_2$  i konfiguracją układu wprowadzania sygnału testującego (rys. 4). Układy sprzęgające CDN-Tx (gdzie  $x = 2, 4$  lub  $8$ ) budowane są dla maksymalnie czterech par linii symetrycznych.



Rys. 4. Schematy ideowe układów sprzęgających stosowanych przy padku:

- a) niesymetrycznych nie ekranowanych dwuprzewodowych linii sygnałowych i sterujących (układ CDN - AF2),  
 b) symetrycznych nie ekranowanych dwuprzewodowych linii sygnałowych i sterujących (układ CDN - T2)

W przypadku kiedy testowana wiązka połączeń galwanicznych składa się z więcej niż ośmiu linii, zalecane jest stosowanie transformatora o specjalnej konstrukcji (ceg prądowych) jako układu wprowadzania sygnału testującego.

### Konstrukcja układów sprzęgających

Nieskomplikowana budowa układów sprzęgających CDN typu M, AF, T umożliwia ich wykonanie we własnym zakresie. Pozwala to na zbudowanie osprzętu niezbędnego do pomiarów przy stosunkowo niewielkim nakładzie finansowym. Wymagane jest jednak zaplecze pomiarowe umożliwiające pomiary, w funkcji częstotliwości, zarówno pojedynczych elementów jak i całego układu.

#### a) Elementy indukcyjne stosowane w układach CDN

We wszystkich rodzajach układów sprzęgających występuje element indukcyjny  $L_s$  złożony z szeregowego połączenia indukcyjności  $L_1$  i  $L_2$ . Tworzą one barierę chroniącą urządzenie dodatkowo przed oddziaływaniem sygnału stosowanego w procesie testowania. Podział indukcyjności  $L_s$  na dwie oddzielne indukcyjności pozwala na uzyskanie ich lepszej charakterystyki częstotliwościowej. Wykonanie indukcyjności  $L_s$  jako pojedynczej cewki nie zapewni, z powodu rezonansu własnego, jej skutecznego działania w wymaganym zakresie częstotliwości. Wymagana wartość impedancji wejściowej na zacisku EUT określa minimalną wartość indukcyjności  $L_s$  przy najniższej częstotliwości pomiarowej  $f = 0,15 \text{ MHz}$ . Jedną z indukcyjności wchodzących w skład  $L_s$  zbudowana jest z udziałem ferrytowego rdzenia toroidalnego lub dwuotworowego [3], druga o mniejszej wartości indukcyjności uzyskana jest przez nawleczenie na prosty przewód jednego lub więcej ferrytowych rdzeni walcowych z otworem. Stosowane w wyżej wymienionych indukcyjnościach rdzenie wykonane są z ferrytu niklowo - cynkowego o przenikalności początkowej  $\mu_i \approx 850$ . Możliwe jest także stosowanie rdzeni z ferrytów manganowo - cynkowych, ale wymagają one dodatkowej izolacji ze względu na niską rezystywność własną materiału ferrytowego. Minimalna wymagana wartość indukcyjności wynosi  $L_1 \approx 240 \div 250 \mu\text{H}$ . Dodanie szeregowo drugiej indukcyjności

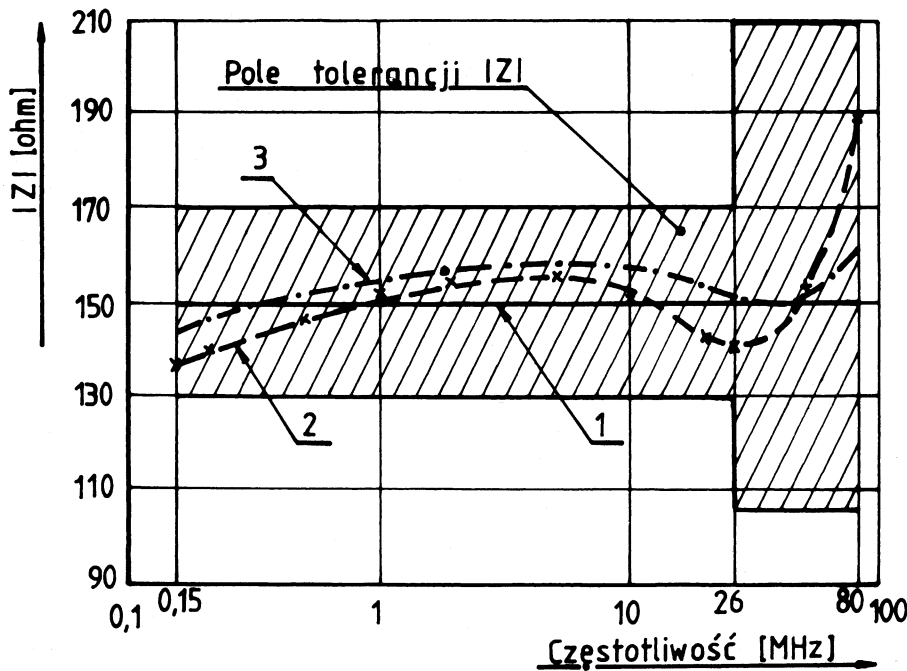
o znacznie mniejszej wartości  $L_2 \approx 10 \mu\text{H}$  powoduje, że ta właśnie indukcyjność zaczyna odgrywać dominującą rolę przy częstotliwościach większych od  $f = 10 \text{ MHz}$ . Indukcyjność  $L_1$  wykonana jest jako jednowarstwowa cewka nawinięta na rdzeniu toroidalnym. Materiał rdzenia należy tak dobrać, aby liczba zwojów spełniała warunek  $10 \leq N \leq 20$ . Wynika to z powodów praktycznych (łatwiej nawinąć na toroidzie mniejszą liczbę zwojów) jak i merytorycznych (mniejsza resztkowa pojemność własna uzwojenia, mniejszy opór omowy dla prądów małej częstotliwości). W przypadku układu sprzęgającego posiadającego więcej niż jedną linię, indukcyjność  $L_1$  nawija się wiązką składającą się z tylu przewodów ile linii ma mieć układ (np. układ CDN-M3 rys. 3c, wiązka składa się z trzech przewodów). W przypadku układów sprzęgających stosowanych w liniach zasilania należy stosować przewody umożliwiające przepływ prądu zasilania o wartości  $I_{AC \max} = 16 \text{ [A]}$ . Maksymalny spadek napięcia na indukcyjności  $L_s$ , wywołany przepływem prądu roboczego nie może być większy niż  $\Delta U_{L_s} \leq 1 \text{ [V]}$ . W przypadku pozostałych rodzajów układów CDN przewody mogą być cieńsze. Wykonując uzwojenie na rdzeniu toroidalnym, zwłaszcza przy nawijaniu grubym przewodem, należy pamiętać o wpływie naprężeń mechanicznych na wartość i stałość w czasie indukcyjności materiału ferrytowego rdzenia. Ponieważ uzwojenie ze względu na jego stałość mechaniczną należy wykonać z odpowiednio silnym naciąganiem, to aby uniknąć wyżej wspomnianych przykrych niespodzianek powinno się stosować przekładki amortyzujące umieszczone między rdzeniem a uzwojeniem. Indukcyjność  $L_2$ , jak już wyżej wspomniano, można wykonać nawlekając na odcinek pojedynczego przewodu lub wiązki przewodów od jednego do kilku ferrytowych rdzeni walcowych. Ilość zastosowanych rdzeni walcowych zależy od rodzaju materiału ferrytowego (należy stosować materiały przeznaczone do pracy w zakresie wyższych częstotliwości) jak również od ich wymiarów geometrycznych [4],[5]. Ze względów praktycznych nie należy stosować więcej niż  $3 \div 4$  rdzeni. W układach sprzęgających typu CDN-T i CDN-AF indukcyjności  $L_1$  można wykonać na mniejszych gabarytowych rdzeniach toroidalnych lub rdzeniach dwuotworowych. Transformatory  $T_1$  i  $T_2$  stosowane w tych układach realizuje się przez nawinięcie bifilarne na rdzeniu dwuotworowym, wykonując odczep w środku. Indukcyjność całego uzwojenia takiego transformatora powinna wynosić  $L_T \leq 6 \mu\text{H}$ .

#### b) Kondensatory stosowane w układach CDN

Kondensatory  $C_1$  stosowane w układach sprzęgających przeznaczonych do linii zasilania, to jest oznakowanych symbolem M, muszą zgodnie z wymaganiami zabezpieczeń przeciwporażeniowych należeć do grupy X-, lub Y-, a ze względów częstotliwościowych preferowane są dyskowe kondensatory ceramiczne. Wartość pojemności  $C_1$  należy tak dobrać aby stała czasowa elementów  $R \times C_1$  wynosiła  $\tau \approx 2 \times 10^{-6} \text{ [s]}$ . Jej wartość powinna być stała i niezależna od ilości linii do których doprowadzany jest sygnał testujący (patrz rys. 3). Oznacza to, że dla układu sprzęgającego, w którym sygnał testujący doprowadzony jest do więcej niż jednej linii, zastosowana kombinacja elementów  $R$  i  $C_1$  powinna mieć wypadkową stałą czasu  $\tau \approx 2 \times 10^{-6} \text{ [s]}$ .

Kondensator  $C_2$  jest kondensatorem poliestrowym o małej indukcyjności własnej, należącym do grupy Y-, i o wartości  $C_2 \approx 0,047 \mu\text{F}$ . Jest to zalecana wartość pojemności, zapewniająca względnie mały prąd upływu dla sygnału o częstotliwości sieci energetycznej i dużą skuteczność w zwieraniu do płaszczyzny masy, sygnału o częstotliwości  $0,15 \div 80 \text{ MHz}$  stosowanego do realizacji testu.

Tęgo samego rodzaju kondensatory można stosować w układach sprzęgających oznaczonych symbolami CDN-T i CDN-AF (układy do linii sygnałowych i informacyjnych). Jednak ze względu na niższe wartości napięć występujących w tych liniach, nie jest wymagane stosowanie kondensatorów z grupy X- lub Y-. Należy jednak pamiętać o doborze elementów pojemnościowych o małej indukcyjności własnej.



Rys. 5. Charakterystyka zmian w funkcji częstotliwości wartości modułu impedancji na zacisku EUT, przy rozwartym zacisku AE i obciążeniu  $R_g = 50 \text{ ohm}$  dołączonym do koncentrycznego gniazda IN.

- 1 - charakterystyka idealna  
2 - charakterystyka zmierzona  
3 - charakterystyka obliczona

### c) Złącza stosowane w układach CDN

Ze względu na prosty montaż, oraz nieskomplikowany sposób dołączenia linii testowanych, łącza oznaczone EUT i AE wykonane są z zacisków laboratoryjnych małej lub średniej wielkości, a sygnał stosowany do testowania doprowadzony jest za pośrednictwem złącza koncentrycznego typu BNC.

### d) Obudowa i montaż układu CDN

Układy sprzęgające można zmontować w obudowach z tworzywa sztucznego. Pozwala to na zmniejszenie pasożytniczych pojemności montażu do masy układu, oraz ułatwia spełnienie wymagań przepisów przeciwporażeniowych, zwłaszcza w przypadku układów z grupy CDN-M. Dobry kontakt masy układu z płaszczyzną masy stanowiska pomiarowego, oraz łatwy sposób mocowania układu CDN na tym stanowisku, uzyskuje się, przytwierdzając do spodu obudowy z tworzywa sztucznego płytkę metalową, której obrzeża będą wystawać po około 10 mm poza obrys obudowy, z dwu stron jej dłuższego boku. Otwory lub owalne, otwarte z jednej strony nacięcia, wykonane w wystających obrzeżach płytki metalowej, umożliwiają łatwe mocowanie układu na stanowisku pomiarowym. Jednocześnie płytka metalowa pełni rolę masy do której dołączone są kondensatory blokujące i masa gniazda BNC. W czasie montażu należy zwrócić uwagę na takie połączenie kondensatora  $C_2$  i masy gniazda BNC, aby indukcyjności tych połączeń były możliwie małe [6]. Indukcyjność  $L_2$  należy dołączyć od strony zacisków EUT ponieważ jej pojemność resztkowa do masy układu jest mniejsza od pojemności resztkowej, większej co do wartości i gabarytów indukcyjności  $L_1$ . Zaleca się zamocowanie indukcyjności  $L_1$  na izolacyjnych podkładkach dystansowych. Zapewni to mechaniczną stabilność elementu oraz zmniejszy, przy odpowiednim materiale i wykonaniu podkładek, jego pojemność rozproszoną do masy. Rezystory  $R$  stosowane w układach CDN są bezindukcyjnymi rezystorami małej mocy.

Przykładowe wyniki pomiaru modułu impedancji zmierzonej na zaciskach EUT dla wykonanego przez autora układu CDN-M3 podano na rys. 5.

### Uwagi i wnioski końcowe

Układy sprzęgające są osprzętem dodatkowym, niezbędnym do wykonania pomiarów odporności urządzeń elektronicznych na zakłócenia przewodzone. Osprzęt ten można kupić, jak również wykonać we własnym zakresie przy niezbyt dużym nakładzie finansowym. Warunkiem powodzenia w takim przypadku jest dobór właściwego materiału ferrytowego, staranne wykonanie elementów indukcyjnych oraz prawidłowy montaż układu w obudowie. Warto wykonać, przed montażem, kilkakrotne pomiary elementów indukcyjnych w odstępach kilkudniowych. Jeżeli nie wykażą one znaczących zmian wartości tych elementów, to można przyjąć, że zostały one wykonane prawidłowo. Jednak ostateczną ocenę jakości wykonanego osprzętu uzyskuje się dopiero po wykonaniu pomiarów kontrolnych gotowego układu. Omówione w tekście, podstawowe układy sprzęgające (według IEC 1000-4-6) nie są jedynymi ze stosowanych w pomiarach mających na celu pełną i wszechstronną ocenę jakości wyrobu z punktu widzenia wymagań przepisów związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną. W przypadku urzą-

żeń stosowanych np. do celów specjalnych, testy są znacznie bardziej złożone i rygorystyczne oraz wymagają znacznie bogatszego specjalistycznego oprzyrządowania. Jednak ze względu na objętość przedstawionego materiału pominięto je w niniejszym opracowaniu, zakładając, że mogą być tematem odrębnej publikacji.

### Literatura

- [1] P. RUSZEL:  
Rola pomiarów przy weryfikacji właściwości kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń technicznych. PAK 9/1998r. Str. 339- 343.
- [2] P. RUSZEL:  
Zalecenia normalizacyjne z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej - barierą czy czynnikiem postępu dla krajowych producentów. PAK 8/1998r str. 306 - 310.
- [3] Unitra - Polfer :  
Materiały i rdzenie ferrytowe. Ferryty magnetycznie miękkie. Katalog wyrobów 1977 r.
- [4] P. RUSZEL:  
Zastosowanie ferrytów do ograniczania sygnałów zakłóceń radioelektrycznych w układach elektronicznych. Raport PRE 1/1999r ZWMiSP Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Praca zgłoszona do publikacji w PAR. Ukaże się prawdopodobnie w IV kwartale 1999 r.
- [5] P. RUSZEL:  
Wpływ czynników zewnętrznych na skuteczność działania ferrytów w układach ograniczania zakłóceń elektromagnetycznych. Raport PRE 2/1999r ZWMi SP Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Praca zgłoszona do publikacji w PAR. Ukaże się prawdopodobnie w IV kwartale 1999 r.
- [6] P. RUSZEL:  
Źródła zakłóceń elektromagnetycznych występujące na płycie drukowanej. PAK 12/1993r str. 289-293.