

## Modelowanie sztucznej sieci do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych w zakresie częstotliwości 150 kHz – 30 MHz

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problematykę budowy sztucznej sieci pomiarowej typu V wykorzystywanej w torach zasilania do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych generowanych przez obiekty elektryczne, stosownie do wymagań cywilnych standardów w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej. Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 55016-1-2 zbudowano model matematyczny dla rozważanej sztucznej sieci. Obliczenia z jego wykorzystaniem pozwoliły na uchwycenie wpływu istotnych elementów i czynników konstrukcyjnych na wartość unormowanej impedancji określonej w normie. Sztuczna sieć pomiarowa wykonana w oparciu o zaproponowaną aplikację z powodzeniem może być wykorzystana w badaniach wstępnych jak i na stanowisku w laboratorium dydaktycznym.

**Abstract.** In this paper the issues of the construction of artificial mains v-networks used in power-supply circuits to measure electromagnetic conducted disturbances generated by electrical objects in accordance with the requirements of civil standards in the field of electromagnetic compatibility was presented. In accordance with the recommendations of PN-EN 55016-1-2, a mathematical model was built for the considered artificial network. Calculations with its use allowed to capture the impact of significant elements and construction factors on the value of normalized impedance specified in the standard. An artificial mains network made on the basis of the proposed application can be successfully used in pre-compliance testing and at the stand in the teaching laboratory. **(Modeling of Artificial Mains Network for electromagnetic disturbances measurements in the frequency range of 150 kHz – 30 MHz).**

**Słowa kluczowe:** kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone, sztuczna sieć pomiarowa typu V, stabilizator impedancji sieci

**Keywords:** electromagnetic compatibility, conducted disturbances, artificial mains v-network, line impedance stabilization network

### Wstęp

Współczesne społeczeństwa w dużym stopniu uzależniły się od licznych urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Obecnie w znacznym stopniu warunkują one prawidłowe działanie społeczności lokalnych jak i globalnych. Duży stopień zagęszczenia różnego rodzaju systemów i urządzeń może prowadzić w zakresie elektromagnetycznym do wzajemnej ich interakcji. Oddziaływania te mogą mieć szereg negatywnych skutków, dlatego tak bardzo istotne są kwestie kompatybilności elektromagnetycznej. W związku z tym na urządzenia elektryczne i elektroniczne są nałożone obostrzenia odnośnie odporności na zaburzenia elektromagnetyczne oraz poziomu emisji tych zaburzeń (przewodzonych i promieniowanych) [1, 2].

Międzynarodowe standardy kompatybilności elektromagnetycznej regulują nie tylko kwestie odporności oraz emisji zaburzeń elektromagnetycznych, ale również metody badań tych zjawisk, konfiguracje stanowisk pomiarowych oraz wymagania odnośnie aparatury pomiarowej [1, 2, 3].

W przypadku urządzeń cywilnych najczęściej w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz [4,5,6,7] (wojskowych 10 kHz – 10 MHz [8], lotniczych 150 kHz – 152 MHz [9]) określone są limity zaburzeń przewodzonych. Aspekt ten jest bardzo istotny przy wspólnym korzystaniu urządzeń z globalnego oraz lokalnego elektroenergetycznego systemu zasilania. Zaburzenia jakie generują urządzenia do sieci elektroenergetycznej mogą być przyczyną wzajemnej ich interakcji. Dlatego bardzo ważne jest aby w fazie projektowania urządzeń, systemów ograniczyć poziom emisji przewodzonej jak i promieniowanej do poziomów zalecanych w przedmiotowych normach [4 ÷ 9].

Badania emisji przewodzonej powinny zapewniać powtarzalność i zgodność otrzymywanych wyników niezależnie od miejsca wykonywania testów. W związku z tym wymagane jest stosowanie podczas testów w obwodach zasilania badanego urządzenia stabilizatorów

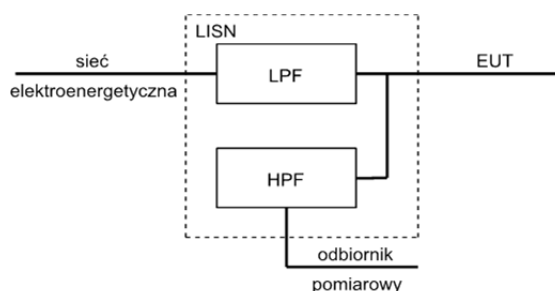
impedancji sieci zasilającej. Sztuczna sieć jest ważnym elementem w torze pomiarowym. Wykonana zgodnie z zaleceniami normy pozwala na jednoznaczny pomiar zaburzeń w każdym laboratorium, jeśli zostaną zachowane wytyczne w zakresie budowy stanowiska pomiarowego. W technice pomiarowej przy pomiarach emisji zaburzeń przewodzonych są powszechnie wykorzystywane trzy typy sieci: typ V, T oraz Delta. Sieci typu V są wykorzystywane najczęściej. W przypadku sieci jednofazowej przy wykorzystaniu sieci typu V mierzy się zaburzenia asymetryczne. Są to przebiegi jakie generowane są na przewodzie fazowym i neutralnym względem uziemionej płaszczyzny odniesienia [1, 2, 3].

Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych, które pozwoliły na opracowanie modelowej sztucznej sieci typu V 50  $\mu$ H || 50  $\Omega$ . Stanowią one fragment prac jakie zostały zawarte w autorskiej pracy dyplomowej obronionej na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w 2017 roku [2].

### Sztuczna sieć pomiarowa

Sztuczna sieć nazywany jest stabilizator impedancji sieci zasilającej (ang. line impedance stabilization network - LISN). Pozwala ona na dostarczenie napięcia zasilającego do badanego obiektu; odspręga zaburzenia emitowane przez badane urządzenie na drodze przewodzonej, a następnie umożliwia ich pomiar za pomocą odbiornika podłączonego do jej portu RF; stabilizuje impedancję sieci zasilającej; eliminuje zaburzenia od strony sieci zasilającej, a także nie pozwala aby zakłócenia emitowane przez badane urządzenie dostawały się do sieci elektroenergetycznej. [1, 2, 3].

W pomiarach zaburzeń przewodzonych w przypadku obiektów cywilnych powszechnie są wykorzystywane sztuczne sieci typu V. Wytyczne do ich budowy oraz charakterystyczne parametry zostały zawarte w normie PN-EN 55016-1-2. Budowę blokową tego typu sieci przedstawiono na rysunku 1.

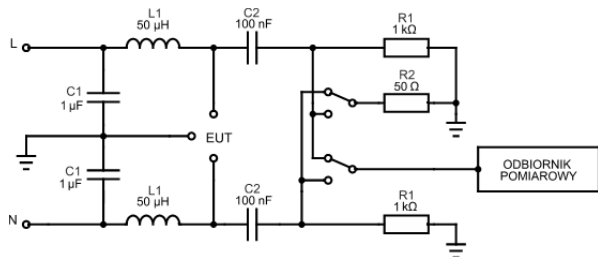


Rys. 1. Schemat blokowy sztucznej sieci

Urządzenie to posiada trzy zaciski - sieciowe, zasilające EUT oraz port pomiarowy do podłączenia odbiornika pomiarowego. Pod względem funkcjonalnym sztuczna sieć pomiarowa jest układem filtrów dolnoprzepustowego (LPF) do filtracji zakłóceń sieciowych oraz górnoprzepustowego (HPF) doprowadzającego do gniazda pomiarowego ograniczone w paśmie przebiegi zaburzeń emitowane przez badane urządzenie [1, 2, 3].

Obszar zastosowań sieci typu V zależy od wartości indukcyjności, która kształtuje wymaganą wartość modułu impedancji. Do zastosowań cywilnych i wojskowych wykorzystywane są sieci 50  $\mu\text{H}$ . Pozwalają one na badanie urządzeń zasilanych napięciem przemiennym i stałym o częstotliwościach od DC do 400 Hz w paśmie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz [2]. W technice pomiarowej wykorzystywane są także sieci 5  $\mu\text{H}$ . Pozwalają one na pomiar w znacznie szerszym zakresie częstotliwości do 150 MHz [9]. Sieci takie są wymagane w pomiarach realizowanych zgodnie z wymaganiami standardu motoryzacyjnego CISPR 25, ISO 7637 czy lotniczego RTCA - DO160.

Wszystkie dostępne na rynku sieci sztuczne konstruowane są z elementów pasywnych. Stosownie do zaleceń standardu PN-EN 55016-1-2 połączone elementy R, L, C, o podanych w normie wartościach pozwalają uzyskać wymagane przebiegi modułu impedancji i fazy. Zalecany przez normę schemat połączeń elementów tworzących sieć LISN typu V przedstawiono na rysunku 2 [3].



Rys. 2. Schemat ideowy sztucznej sieci typu V

Komponenty  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $R_1$  wraz z impedancją wejściową odbiornika pomiarowego określają wartość zespolonej impedancji stabilizatora, natomiast kondensator  $C_2$  zabezpiecza odbiornik pomiarowy przed przebiegami napięcia zasilającego badane urządzenie. Zamieszczone na rysunku 2 wartości elementów są zalecane przez normę PN-EN 55016-1-2 dla jej wersji z dolną częstotliwością pomiarową o wartości 150 kHz. Sztuczna sieć skonstruowana w oparciu o ten schemat jest optymalna jeśli posiadamy czyste źródło zasilania. W przypadku zasilania badanych urządzeń z sieci elektroenergetycznej wskazane jest rozbudowanie sieci o dodatkowy człon z filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości granicznej znacznie oddalonej od jej dolnej częstotliwości pomiarowej. Filtr taki zbudowany jest z cewki powietrznej 250  $\mu\text{H}$  i kondensatora 4  $\mu\text{F}$  połączonego szeregowo z rezystorem o rezystancji 10  $\Omega$  [3].

### Konstrukcja cewki 50 $\mu\text{H}$

Najistotniejszym elementem konstruowanego urządzenia są cewki powietrzne 50  $\mu\text{H}$  kształtujące wartość modułu impedancji w torze przewodu fazowego i neutralnego sieci jednofazowej. W przypadku sieci trójfazowej w sieci mamy cztery takie cewki. Przykładowa konstrukcja cewki powietrznej 50  $\mu\text{H}$  jest opisana w normie PN-EN 55016-1-2. Element ten charakteryzuje się jednak bardzo dużymi wymiarami geometrycznymi i nieoptymalną średnicą drutu nawojowego w stosunku do założonej obciążalności prądowej projektowanej sieci.

Istotny w procesie projektowania tego elementu jest fakt, że cewka umieszczona w ekranie zmniejsza swoją indukcyjność. Przystępując do projektowania modelowej sztucznej sieci założono, że będzie ona pozwalała na pomiary w paśmie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz i umożliwi pomiary w obwodach o obciążalności do 10 A. Aby uwzględnić wpływ metalowej obudowy na wartość indukcyjności cewki skorzystano z zależności 1, która ten efekt ujmuje. Pomimo, że w obliczeniach cewka otoczona jest ekranem w kształcie walca zależność ta pozwoliła znacząco zbliżyć wynik obliczeń do wartości otrzymanych podczas pomiarów. Długość cewki zdefiniowała długość obudowy, natomiast rozmiary ekranu parametry geometryczne obudowy.

$$(1) \quad L_e = L \cdot \left( 1 - \left( \frac{D}{D_e} \right)^3 \right) \left( 1 - \left( \frac{l}{2l_e} \right)^2 \right)$$

gdzie:  $L$  oznacza wartość indukcyjności cewki poza metalowym ekranem w  $\mu\text{H}$ ,  $L_e$  – wartość indukcyjności cewki ekranowanej w  $\mu\text{H}$ ,  $D$  – średnicę cewki w m,  $D_e$  – szerokość ekranu w m,  $l$  – długość uzwojenia w m,  $l_e$  – długość ekranu w m

Wartość indukcyjności cewki poza ekranem obliczono na podstawie przekształcenia wzoru 1 do postaci 2. Założono wymiary karkasu  $D = 0,05$  m,  $l = 0,12$  m, wymiary ekranu  $D_e = 0,3$  m,  $l_e = 0,18$  m oraz wartość indukcyjności cewki w ekranie  $L_e = 50$   $\mu\text{H}$ .

$$(2) \quad L = \frac{L_e}{\left( 1 - \left( \frac{D}{D_e} \right)^3 \right) \left( 1 - \left( \frac{l}{2l_e} \right)^2 \right)}$$

Z obliczonej wartości indukcyjności, korzystając ze wzoru 3, wyznaczono liczbę zwojów  $n$  do nawinięcia na założonym karkasie.

$$(3) \quad n = \sqrt{\frac{L \left( \frac{l}{D} + 0,45 \right)}{D}}$$

gdzie:  $n$  oznacza liczbę zwojów

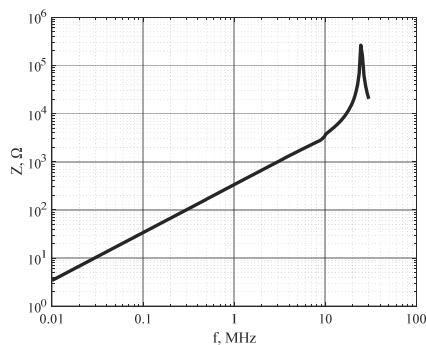
Grubość drutu nawojowego określono korzystając z zależności 4. Przyjęto dopuszczalną obciążalność prądową  $I$  projektowanej sieci sztucznej równą 10 A. Założono gęstość prądu  $J$  w przewodniku wynoszącą 5  $\text{A}/\text{mm}^2$ .

$$(4) \quad d = 2 \sqrt{\frac{I}{J\pi}}$$

gdzie:  $d$  oznacza średnicę drutu nawojowego w m.

Na podstawie wykonanych obliczeń na karkasie z PVC, drutem o średnicy 1,5 mm, nawinięto 57 zwojów drutu

emaliowanego. Konstrukcja ta pozwoliła na uzyskanie cewki o indukcyjności 56,5  $\mu\text{H}$ . Dla modelowej cewki przy wykorzystaniu analizatora impedancji firmy Agilent 9194A zmierzono jej impedancję. Zmierzony przebieg modułu impedancji dla rozważanego elementu przedstawiono na rysunku 3.

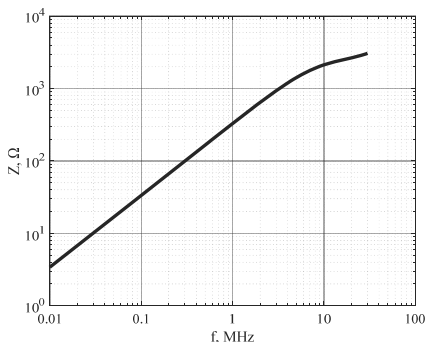


Rys. 3. Moduł impedancji w funkcji częstotliwości

Dla wykonanej cewki przy częstotliwości 24,7 MHz zachodzi zjawisko rezonansu własnego. Wartość tej częstotliwości znajduje się w paśmie roboczym sieci, co ma istotny wpływ na problem z uzyskaniem wymaganej wartości modułu impedancji LISN. Aby ten wpływ wyeliminować należy wykonać podział cewki na sekcje oraz kompensację rezystancyjną pasożytniczych pojemności międzyzwojowych. Boczniując wybrane sekcje uzwojeń cewki można uzyskać efekt przesunięcia wartości częstotliwości rezonansowej w zakres powyżej 30 MHz. Dokładny sposób tłumienia rezonansu został opisany w normie, jednak z uwagi na zmianę wymiarów geometrycznych elementu należało dobrać nowy sposób podziału indukcyjności na sekcje. Empirycznie określono, że wytłumienie efektów rezonansowych można osiągnąć przy podziale na 9 sekcji bocznikowanych rezystorami 330  $\Omega$ . Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono odpowiednio fotografię wykonanej cewki oraz jej charakterystykę impedancyjną po wykonaniu kompensacji efektów rezonansowych.

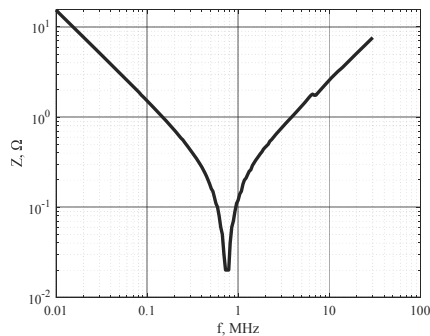


Rys. 4. Fotografia cewki z rezystorami bocznikującymi sekcje uzwojeń

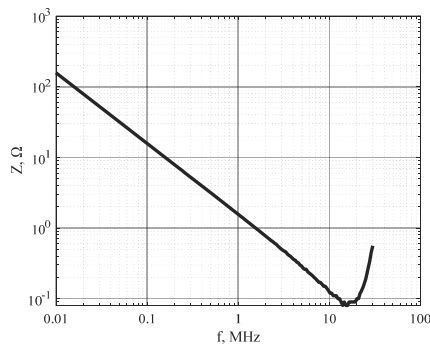


Rys. 5. Zmiana modułu impedancji modelowej cewki w funkcji częstotliwości z bocznikowanymi sekcjami uzwojeń

Wpływ na wartości modułu impedancji sieci posiadają również elementy pasożytnicze zastosowanych w projekcie kondensatorów polipropylenowych o wartościach odpowiednio  $C_1 = 1\mu\text{F}$  i  $C_2 = 100\text{ nF}$ . W związku z tym wykonano pomiary modułów impedancji tych elementów w funkcji częstotliwości. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Charakterystyka modułu impedancji polipropylenowego kondensatora  $C_1$  o pojemności 1  $\mu\text{F}$

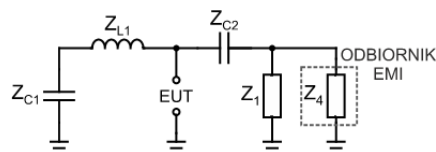


Rys. 7. Charakterystyka modułu impedancji polipropylenowego kondensatora  $C_2$  o pojemności 100 nF

Elementy pasożytnicze kondensatorów  $C_1$  i  $C_2$  w zakresie częstotliwości poniżej 100 kHz mogą powodować odchylenia wartości impedancji sieci od wartości określonych w normie. Wartości te można obniżyć za pomocą dołączanych równolegle rezystorów.

#### Model analityczny dla sztucznej sieci

Na rysunku 8 przedstawiono schemat zastępczy sztucznej sieci.



Rys. 8. Schemat zastępczy sztucznej sieci typu V

Impedancję zastępczą układu ogólnie można opisać zależnością 5.

$$(5) \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{C1} + Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{C2} + \frac{Z_1 Z_4}{Z_1 + Z_4}}}$$

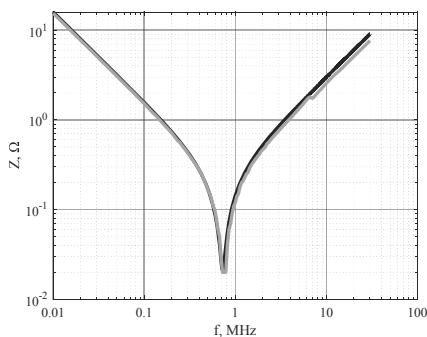
gdzie:  $Z_{C1}$  oznacza impedancję kondensatora  $C_1$ ,  $Z_{C2}$  – impedancję kondensatora  $C_2$ ,  $Z_{L1}$  – impedancję cewki powietrznej  $L_1$ ,  $Z_1$  – impedancję rezystora  $R_1$ ,  $Z_4$  – impedancję wejściową odbiornika pomiarowego - 50  $\Omega$ .

Równanie to uwzględnia występowanie w układzie elementów idealnych. W celu wyznaczenia rzeczywistej impedancji należy uwzględnić w modelu elementy pasywności elementów kształtujących wartość impedancji. Złożoność zastosowanego modelu zastępczego zależy od szerokości pasma. Impedancje rzeczywistych elementów pasywnych opisano zależnościami 6 – 7. W analizie założono, że rezystory są elementami idealnymi. W paśmie do 30 MHz każdy typ rezystora może być aproksymowany modelem idealnym. Jego pojemności pasywności i indukcyjności posiadają mało istotny wpływ [10].

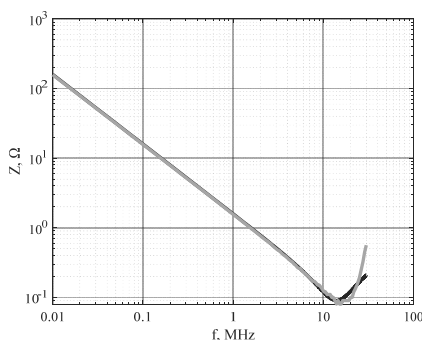
$$(6) \quad Z_{CX} = R_{sx} + j\left(\omega L_{sx} - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$(7) \quad Z_{LX} = \frac{R_{sx} + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_{wx} + j\omega R_{sx} C_{wx}}$$

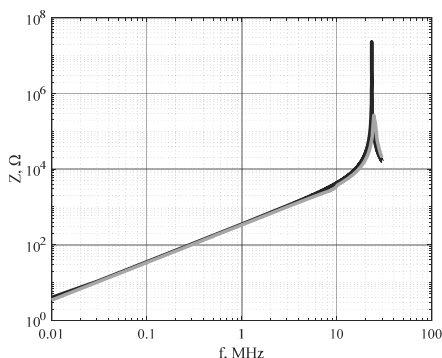
gdzie:  $Z_{CX}$  oznacza impedancję kondensatora,  $R_{sx}$  – pasywną rezystancję,  $L_{sx}$  – pasywną indukcyjność kondensatora,  $Z_{LX}$  – impedancję cewki,  $C_{wx}$  – pojemność własną cewki



Rys. 9. Charakterystyki modułu impedancji kondensatora  $C_1$  (krzywa czarna – obliczona, krzywa szara – zmierzona)



Rys. 10. Charakterystyki modułu impedancji dla kondensatora  $C_2$  (krzywa czarna – obliczona, krzywa szara – zmierzona)



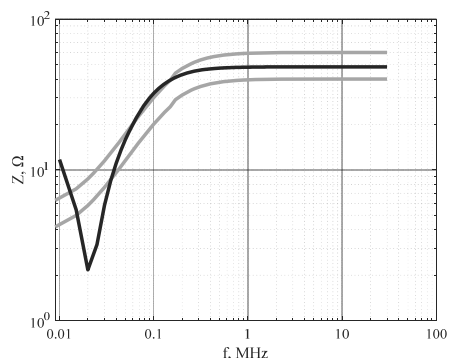
Rys. 11. Charakterystyki modułu impedancji dla cewki L1 (krzywa czarna – obliczona, krzywa szara – zmierzona)

Na rysunkach 9 – 11 przedstawiono wyznaczone analitycznie charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości wykorzystanych elementów. W obliczeniach przyjęto następujące wartości parametrów pasywnościowych:

- kondensator  $C_1$ :  $R_{s1} = 20 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{s1} = 47,7 \text{ nH}$ ;
- kondensator  $C_2$ :  $R_{s2} = 80 \text{ m}\Omega$ ,  $L_{s2} = 1,098 \text{ nH}$ ;
- cewka  $L_1$ :  $R_{s3} = 2 \Omega$ ;  $C_{w1} = 0,82 \text{ pF}$ .

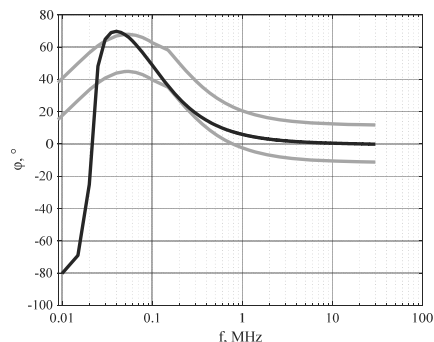
Wyznaczone analitycznie i zmierzone eksperymentalnie charakterystyki modułów impedancji elementów pasywnych są zgodne co do charakteru ich zmienności jak i wartości. Nieznaczne rozbieżności w zakresie wyższych częstotliwości są do zaakceptowania uwzględniając tolerancję wartości modułu impedancji określoną w normie. Zastosowane w analizie modele zastępcze analizowanych elementów zapewniają wystarczająco dobrą ich aproksymację.

Impedancja zespolona sztucznej sieci jest jednoznacznie określona w normie PN-EN-55016. Z uwagi na trudność skonstruowania idealnego urządzenia dopuszczone są odchylenia wartości modułu impedancji o  $\pm 20\%$  oraz fazy o  $\pm 11,5^\circ$ . W normie w tabelarycznej formie mamy podane wartości impedancji i przedziały jej tolerancji [3]. Na rysunkach 12 – 13 przedstawiono wyznaczone analitycznie przebiegi modułu impedancji i fazy dla układu sieci sztucznej modelowanego za pomocą elementów rzeczywistych. Otrzymane rezultaty obliczeń odniesiono do wartości granicznych (80% oraz 120% wartości normatywnych).

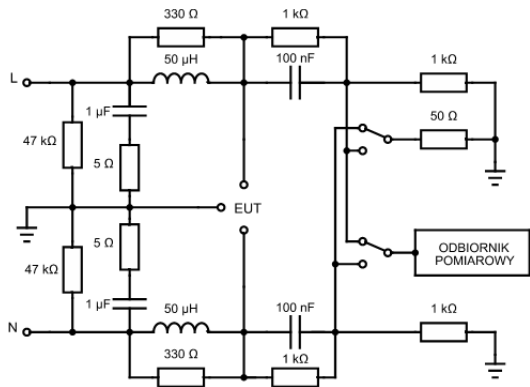


Rys. 12. Wyznaczona analitycznie charakterystyka modułu impedancji sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywe szare)

Wyznaczona analitycznie krzywa zmienności modułu impedancji dla podstawowej konfiguracji wykazuje w zakresie częstotliwości od 9kHz do 30 MHz efekt rezonansowy. Na rysunku 14 przedstawiono schemat ideowy sztucznej sieci, na którym uwzględniono dodatkowe elementy rezystancyjne poprawiające parametry projektowanego urządzenia.

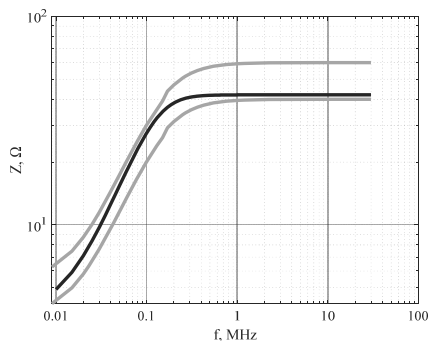


Rys. 13. Wyznaczona analitycznie charakterystyka fazowa sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywa szara)



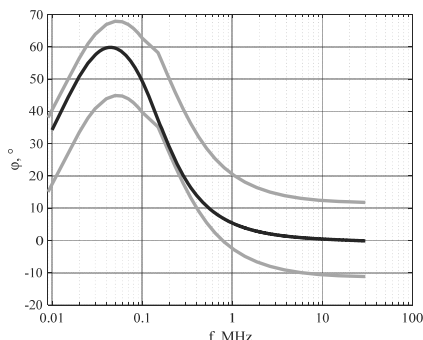
Rys. 14. Schemat ideowy układu sztucznej sieci z elementami kompensującymi rezonans w paśmie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz

Dla zmodyfikowanej aplikacji sztucznej sieci, w której wprowadzono dodatkowe elementy korygujące dobroci elementów pojemnościowych, wyznaczono w programie Matlab przy wykorzystaniu opracowanego modelu zmienność modułu impedancji i fazy po tej modyfikacji. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 15 i 16.



Rys.15. Wyznaczona analitycznie charakterystyka modułu impedancji dla zmodyfikowanej aplikacji sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywe szare)

Analiza matematyczna potwierdza słuszność przyjętej koncepcji. Wyznaczone przebiegi modułu impedancji i fazy zmodyfikowanej sztucznej sieci zawierają się w przedziałach tolerancji wartości określonych w normie.



Rys.16. Wyznaczona analitycznie charakterystyka fazowa dla zmodyfikowanej aplikacji sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywe szare)

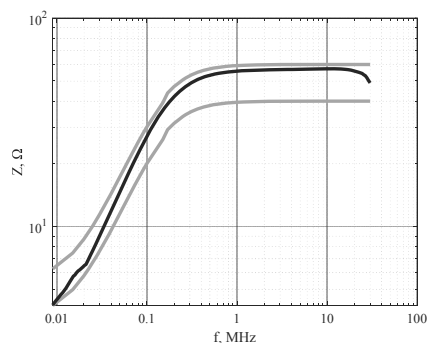
### Badania doświadczalne

Na podstawie wytycznych standardu PN-EN-55016-1-2 z uwzględnieniem wniosków uzyskanych z badań symulacyjnych, zbudowano sztuczną sieć typu V. W celu zintegrowania wszystkich elementów konstrukcyjnych

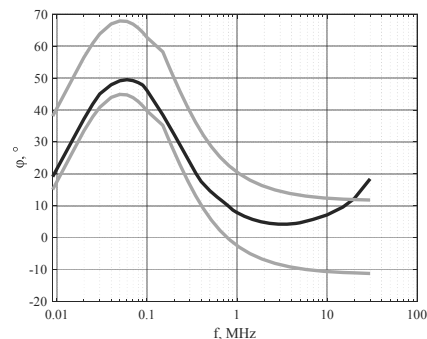
wykonano płytke PCB. Aby uniknąć efektu sprzężenia pomiędzy cewką obwodu fazy i przewodu neutralnego na płytce PCB umieszczono je w odległości 0,1 m, a całość płytki umieszczono w metalowej obudowie.

Zespoloną impedancję sztucznej sieci na zbudowanym stanowisku testowym zmierzono za pomocą analizatora impedancji Agilent 9194A. Do połączenia portów L, N sztucznej sieci z analizatorem impedancji wykonano adaptery pozwalające na ich wzajemne połączenie. Ważne jest aby długość połączeń w obwodzie sygnałowym była jak najmniejsza. Pasożytnicze elementy w tym przypadku posiadają znaczący wpływ na przebieg fazy w zakresie górnych częstotliwości pomiarowych. Badana sztuczna sieć została umieszczona na metalowej płaszczyźnie, która ekwipotencjalnie za pomocą metalowej tasiemki była połączona z analizatorem impedancji, a całe stanowisko podłączono do uziomu.

Zmierzone przebiegi modułu impedancji oraz fazy przedstawiono na rysunkach 17 – 18.



Rys.17. Zbadana doświadczalnie charakterystyka modułu impedancji dla zmodyfikowanej aplikacji sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywe szare)



Rys.18. Zbadana doświadczalnie charakterystyka fazowa dla zmodyfikowanej aplikacji sztucznej sieci (krzywa czarna) z zaznaczonym przedziałem jej tolerancji (krzywe szare)

Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły zgodność ich wyników z wynikami obliczeń. Wykonana sztuczna sieć spełnia wymagania normy PN-EN 55016-1-2 w zakresie wymaganych wartości zespolonej impedancji w pełnym zakresie częstotliwości (9 kHz – 30 MHz). Obserwowane odchylenia wartości kąta fazowego w zakresie częstotliwości powyżej 20 MHz są spowodowane wartością impedancji połączenia sztucznej sieci z analizatorem impedancji [11, 12]. Odchylenia te jednak nie wpływają na ocenę zgodności wykonanej sieci do stosowania w torze pomiarowym do badań emisji przewodzonej. W przypadkach gdy niemożliwe jest spełnienie wymagań fazowych dopuszczane jest zastosowanie takiej sieci, jednak konieczne jest uwzględnienie zmierzonej wartości kąta fazowego w ocenie niepewności rozszerzonej (zgodnie ze standardem PN-EN 55016-4-2) [3].

## Podsumowanie

W artykule uwaga została poświęcona kwestii modelowania sztucznej sieci pomiarowej typu V dedykowanej do pomiaru emisji zaburzeń elektromagnetycznych zgodnie z wymaganiami między innymi norm [4, 5, 6, 7] w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej. Jest to bardzo ważny element stanowiska pomiarowego do pomiaru emisji zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez urządzenia elektryczne i elektroniczne. W opracowaniu [2] podjęto się zadania zbudowania takiej sieci. Układowo sieć taka charakteryzuje się prostotą. Jednak w rzeczywistej aplikacji, jak potwierdziły to przeprowadzone badania wystąpiły efekty rezonansowe. Są one bezpośrednią konsekwencją nieidealności elementów. Cewka powietrzna 50  $\mu\text{H}$  determinująca wartość modułu impedancji sieci poza indukcyjnością posiada także pasożytniczą pojemność. Jest ona odpowiedzialna za efekty rezonansowe w górnym paśmie częstotliwości. Aby rezonans ten przesunąć poza zakres analizowanych częstotliwości sekcje uzwojenia cewki bocznikujemy rezystorami. Podobnie kondensatory użyte w aplikacji zalecane przez normę posiadały punkty rezonansowe mieszczące się w rozważanym zakresie częstotliwości. Aby złagodzić ich oddziaływanie na sumaryczną wartość modułu impedancji, należy je bocznikować rezystorami. W literaturze brak jest zaleceń w aspekcie doboru tych wartości. Jak zaprezentowano to w artykule wykorzystano tu opracowany model. Pozwolił on na oszacowanie rzędu wartości tej rezystancji. Finalnie wartości rezystorów skorygowano podczas testów w rzeczywistym modelu sieci. Przeprowadzone badania doświadczalne i uzyskane wyniki pozwoliły jednoznacznie zweryfikować wyniki badań symulacyjnych.

**Autorzy:** mgr inż. Magdalena Nizioł, Politechnika Rzeszowska, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: m.nizioł@prz.edu.pl; dr inż. Wiesław Sabat, Politechnika Rzeszowska, Katedra Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: wsabat@prz.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Ott H.W., Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons, New Jersey 2009
- [2] Nizioł M., Sztuczna sieć pomiarowa do pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych w układach zasilania urządzeń elektronicznych, praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, 2017
- [3] PN-EN 55016-1-2:2014-09, Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia. Część 1-2: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności – Układy sprzęgające dla pomiarów zaburzeń przewodzonych
- [4] PN-EN 55011:2016-06, Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne. Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej. Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru
- [5] PN-EN 55014-1:2017-06, Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń. Część 1: Emisja
- [6] PN-EN 55015:2013-10, Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez elektryczne urządzenia oświetleniowe i urządzenia podobne
- [7] PN-EN 55032:2015-09, Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń multimedialnych -- Wymagania dotyczące emisji
- [8] MIL-STD461G, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment
- [9] RTCA DO160G, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment
- [10] Bogatin E., Signal Power Integrity – Simplified, 3rd Edition, Prentice Hall, 2018
- [11] Borecki M., Sroka J., Adaptation of the Artificial Mains Network (AMN) to the Updated Requirements of CISPR 16-1-2:2014, 19th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering, 2018
- [12] Ziade F., Kokalj M., Ouameur M., Pinter B., Belieres D., Poletaef A., Allan D., Improvement of LISN Measurement Accuracy Based on Calculable Adapters, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65 (2016), n.2, 365-377