



Analiza skuteczności tłumienia zaburzeń elektromagnetycznych dławikami przeciwzakłóceniovymi

PAWEŁ A. MAZUREK

Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii,
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38a

Streszczenie. Artykuł przedstawia analizę tłumienności wtrąceniowej rdzeniowych dławików przeciwzakłóceniovych. Zaproponowano zmodyfikowany schemat zastępczy (z elementami pasożytniczymi). Na bazie modelu dławika (uzależnionego od częstotliwości) przeprowadzono symulacje wpływu zjawisk i wielkości fizycznych na tłumienność wtrąceniową. W artykule zamieszczono wybrane symulacje i pomiary.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia elektromagnetyczne, dławiki przeciwzakłóceniovowe, rdzenie nanokrystaliczne

Symbole UKD: 537.8

Wstęp

Poprawne działanie obiektów elektrycznych, a w szczególności elektronicznych, zależy w dużym stopniu od ich odporności na zaburzenia elektromagnetyczne. Powoduje to wzrastające zainteresowanie problematyką harmonijnej pracy urządzeń i systemów. Wzrost liczby i formy zagrożeń elektromagnetycznych oraz zwiększenie wymagań odnośnie do jakości, energooszczędności i niezawodności eksploatacyjnej urządzeń elektrycznych stały się podstawą do powstania dziedziny techniki zwanej kompatybilnością elektromagnetyczną (EMC).

Charakterystyki czasowe i rozkłady energii zaburzeń elektromagnetycznych są zależne od struktury fizycznej i parametrów obiektu w zakresie małych, średnich i wielkich częstotliwości. Generowane zaburzenia mogą migrować w otaczającym nas

środowisku elektromagnetycznym wskutek promieniowania elektromagnetycznego (w tym sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych) oraz poprzez przewodzenie [1, 2, 3, 4]. Problemy kompatybilności elektromagnetycznej można rozwiązać, stosując odpowiednie środki przeciwzakłóceniami. W zakresie ochrony przed emisją pól elektromagnetycznych, elektrycznych i magnetycznych dominują ekrany, natomiast przed zakłóceniami przewodzonymi — układy filtrujące. Skuteczność działania filtrów i ekranów zależy m.in. od własności częstotliwościowych montowanych elementów, ich konfiguracji i jakości połączeń.

Modelowanie tłumienności wtrąceniowej dławika przeciwzakłóceniewego

Klasyczne rozwiązania przeciwzakłóceniewych dławików oparte są głównie na ferrytach modelowanych szeregowym połączeniem elementów R i L . Taka interpretacja umożliwia projektowanie prostych aplikacji, np. koralika ferrytowego, przy czym dla częstotliwości powyżej kilkudziesięciu megaherców powstają znaczne różnice pomiędzy analitycznymi i rzeczywistymi wartościami tłumienia. Pojawienie się nowoczesnych materiałów rdzeniowych otwiera nowe szanse i wyzwania. Właściwości materiałów amorficznych na bazie kobaltu i nanokrystalicznych na bazie żelaza wykazują możliwości zastosowania ich w rdzeniowych aplikacjach przeciwzakłóceniewych [5]. Ich odpowiednio duża przenikalność magnetyczna i minimalne straty są podstawą do konkurencyjnych rozwiązań na rynku elementów indukcyjnych. Ważne są zatem badania wykazujące skuteczność modeli dławików z materiałów innych niż ferryt, jak również pomiary wartości uzyskiwanych tłumienności dławików z nowoczesnych magnetyków.

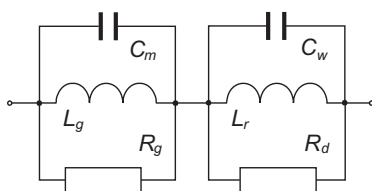
W procesie eliminacji lub obniżania poziomu zaburzeń kluczową rolę odgrywają elementy umożliwiające ich ograniczanie. Stosowanie środków przeciwzakłóceniewych u źródeł zaburzeń stanowi podstawową metodę zwalczania zaburzeń elektromagnetycznych. Skuteczność tych środków i nakłady finansowe potrzebne do uzyskania zgodności poziomu zaburzeń z wymogami obowiązujących norm są uzależnione od wielu czynników. Dominującymi są właściwości fizyczne źródeł zakłóceń oraz środków przeciwzakłóceniewych. Bardzo ważne staje się zatem odpowiednie konstruowanie urządzeń i właściwe ich integrowanie z urządzeniami ochronnymi.

Najskuteczniejszą metodą obniżania poziomu zaburzeń w liniach zasilania jest stosowanie filtrów. Urządzenia te z jednej strony tłumią zaburzenia występujące w sieciach, a z drugiej nie dopuszczają do propagacji zaburzeń generowanych przez odbiornik energii. Typowym reprezentantem grupy przeciwzakłóceniewych układów ograniczających jest dławik przeciwzakłóceniewy z rdzeniem z materiału magnetycznie miękkiego (najczęściej ferrytowego).

Ponieważ w ramach określania kompatybilności elektromagnetycznej rozważane są oddziaływania zakłócających sygnałów symetrycznych oraz asymetrycznych, modelowanie i badanie dławika również jest realizowane w tych dwóch aspektach. Zastosowany model dławika odwzorowuje schemat zastępczy zawierający elementy o stałych skupionych.

W analizie tłumienia przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych dławikami o rdzeniach z miękkich materiałów magnetycznych, parametrem określającym efektywność eliminowania zakłóceń jest tłumienność wtrąceniowa a . Tłumienność ta wyrażona jest poprzez stosunek poziomów sygnału na obciążeniu przy odłączonym i włączonym dławiku ograniczającym. Tłumienność można także uzależnić od istniejących w obwodzie impedancji [1, 2, 3, 4].

W ramach prowadzonych badań [1] wprowadzono do analizy zmodyfikowany schemat zastępczy dławika przeciwzakłóceniewego. Jego struktura umożliwiła wygenerowanie funkcji o kilku ekstremach lokalnych, a jednocześnie uzyskiwane wartości tłumienności w początkowej części charakterystyki są zbieżne z klasycznymi modelami. Strukturę zmodyfikowanego schematu dławika przeciwzakłóceniewego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Zmodyfikowany schemat zastępczy dławika [1, 2, 3, 4]

Pierwszy człon charakteryzuje podstawowe elementy dławika, tj. jego główną indukcyjność L_g , rezystancję rdzenia R_g oraz pojemność elektryczną międzyprzewodową C_m . Drugi człon odpowiada za kształt krzywej w zakresie najwyższych częstotliwości. Element C_w reprezentuje pojemność międzywarstwową pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem, L_r to indukcyjność rozproszenia i indukcyjności wyprowadzeń dławika. Element R_d stanowi rezystancję reprezentującą straty dodatkowe (obejmujące m.in. straty histerezy czy też termiczne zjawiska wtórne) wraz z rezystancją uzwojenia.

Modelowanie krzywej przenikalności magnetycznej rdzenia sprowadza się do aproksymowania przebiegu krzywych katalogowych producenta wybraną funkcją matematyczną. Względna przenikalność magnetyczna materiału ferromagnetycznego zależy od częstotliwości. Model matematyczny opisujący przenikalność magnetyczną materiału został przyjęty z rozważań Stolla [1], przyjmującego dominację prądów wirowych. Założono jednorodny obszar materiału ze względu na właściwości magnetyczne (określone przez bezwzględną przenikalność ma-

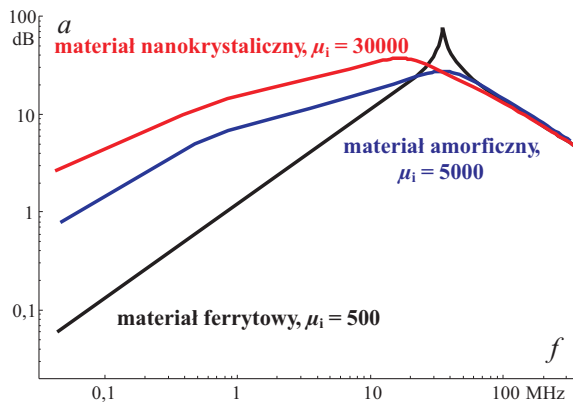
gnetyczną) i właściwości elektryczne (konduktywność). Przy małych wartościach natężenia pola magnetycznego względna przenikalność magnetyka równa się wartości względnej przenikalności początkowej $\mu_r \approx \mu_i$.

Kolejnymi elementami występującymi w zastępczym schemacie dławika (rys. 1) są pojemności pasożytnicze, indukcyjność rozproszenia i wyprowadzeń dławika oraz rezystancja strat histerezowych, termicznych zjawisk wtórnych i rezystancja uzwojenia. Zdefiniowanie ich równaniami matematycznymi umożliwia powstanie modelu dławika przeciwzakłóceniewego zależnego od przenikalności, rezystywności, indukcji nasycenia rdzenia, jego wymiarów i parametrów uzwojenia [1, 2, 3, 4, 5].

Wpływ zjawisk i wielkości fizycznych na tłumienność dławika

Początkowa przenikalność magnetyczna rdzenia jest główną wielkością wpływającą na tłumienność wtrąceniową dławika przeciwzakłóceniewego.

Wyraźne są również relacje wpływu samego rodzaju materiału rdzenia na tłumienność wtrąceniową dławika. Analizie poddano trzy dostępne materiały rdzeniowe o przenikalności początkowej odpowiednio: nanokrystaliczny $\mu_i = 30\,000$, amorficzny $\mu_i = 5000$ i ferrytowy o $\mu_i = 500$. Szczególnie ważne jest porównanie charakterystyk w początkowym zakresie przeciwzakłóceniewego działania — do 30 MHz. Jak widać na rysunku 2 kształt krzywych funkcji $a = f(f)$ materiału amorficznego i nanokrystalicznego jest zbliżony co potwierdza „podobny” skład chemiczny, konstrukcję i właściwości tych magnetyków. Uzyskiwane tłumienności przyjmują jednak większe wartości dla nanokrystalika, który ma wielokrotnie większą przenikalność początkową. Natomiast charakter zmian tłumienności rdzenia ferrytowego jest bardziej dynamiczny w zakresie lokalnego ekstremum funkcji

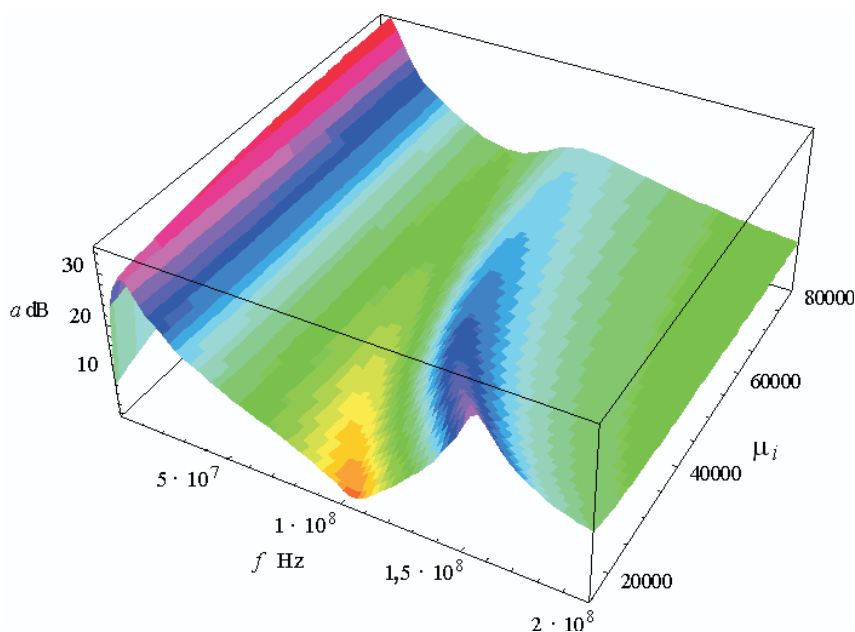


Rys. 2. Tłumienność wtrąceniowa dławików o różnych materiałach rdzeniowych ($N = 3$, wymiary identyczne)

tłumienności. Wiąże się to ze wzrostem strat w ferrycie w okolicach częstotliwości rezonansu ferromagnetycznego (przebieg składowej urojonej zespolonej względnej przenikalności magnetycznej wykazuje maksimum).

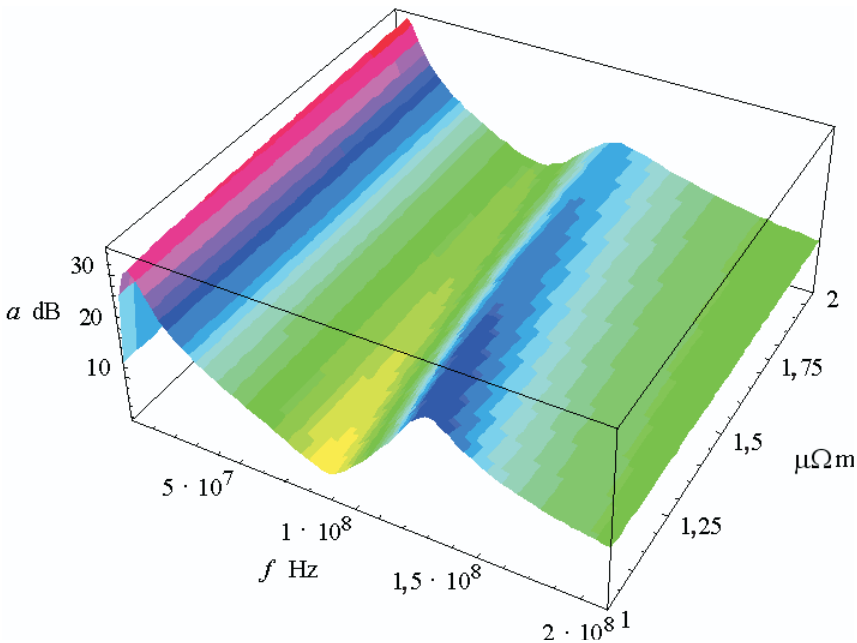
Do analizy oddziaływania względnej przenikalności magnetycznej, jednego już rodzaju magnetyka, wybrano materiał nanokrystaliczny z uwagi na najszerszy zakres występujących wartości μ_i (15 000-80 000).

Uzyskane wyniki dowodzą otrzymywania największych wartości tłumienności dla rdzeni z największymi wartościami przenikalności. Jednocześnie wraz ze wzrostem przenikalności, pierwsze ekstremum krzywej — główne maksimum, przesunęło się w kierunku mniejszych częstotliwości, co oznacza przyjmowanie dużych wartości tłumienności już w niższym, nawet kilkusetkilohercowym zakresie częstotliwości. Kolejne maksimum wynika z oddziaływania dodatkowych indukcyjności rozproszenia i doprowadzeń, pojemności międzywarstwowej oraz rezystancji dodatkowej. Wraz ze wzrostem przenikalności wartości częstotliwości drugiego maksimum tłumienności zbliżają się do częstotliwości pierwszego. Jednocześnie charakter narastającego i opadającego zbocza drugiego maksimum staje się coraz łagodniejszy. Symulacje przeprowadzone dla innych magnetyków wykazały identyczne wnioski [1].



Rys. 3. Tłumienność wtrąceniowa rdzenia w funkcji częstotliwości oraz przenikalności magnetycznej nanokrystalika (5 zwojów) [1]

Wpływ zmian rezystywności materiału rdzeniowego na tłumienność wtrącenową prezentuje symulacja na rysunku 4. Wzrost rezystywności skutkuje nieznacznym podwyższeniem tłumienności szczególnie w zakresie niższych częstotliwości. W zakresie wyższych częstotliwości charakter zmian jest łagodniejszy. Wartość tłumienności drugiego ekstremum maleje, niemniej obszary funkcji wokół tego ekstremum wykazują pewien wzrost względem wyników uzyskiwanych dla mniejszych rezystywności.

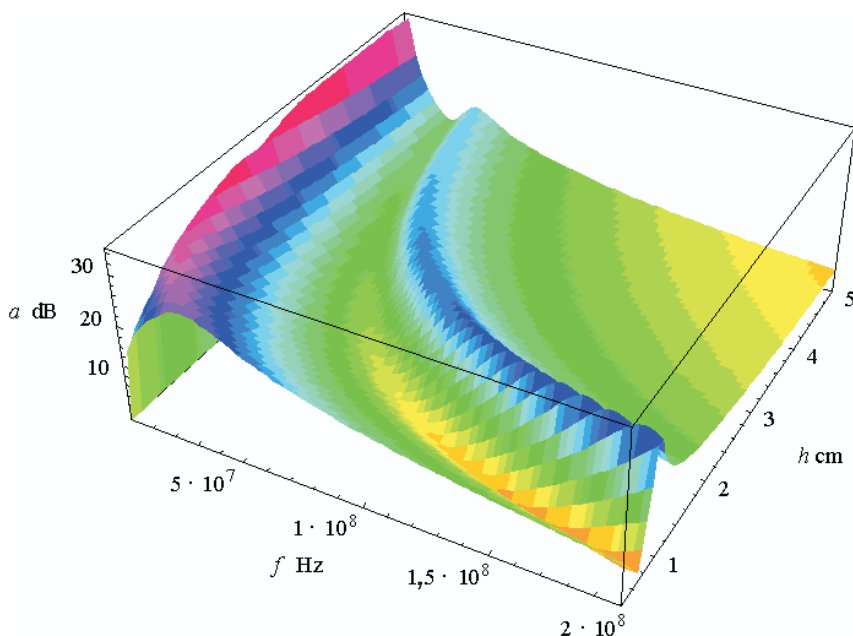


Rys. 4. Wpływ zmian rezystywności magnetyka (1-2 $\mu\Omega m$) na tłumienność wtrącenową dławika [1]

Kolejnymi parametrami fizycznymi wpływającymi na skuteczność tłumienia zakłóceń dławikami przeciwzakłóceniovymi są objętość rdzenia i liczba zwojów.

Zgodnie z przewidywaniami, modelowane tłumienności rdzenia magnetycznego wykazują wzrost wartości wraz ze zwiększeniem objętości w otoczeniu pierwszego ekstremum. Natomiast zwiększanie objętości odniesione do drugiego ekstremum powoduje jego zbieżne zmniejszenie w kierunku niższych częstotliwości. Porównanie zmian tłumienności dla różnych wartości średnicy zewnętrznej, (czyli pola powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia) i długości rdzenia wykazuje, że dynamicznym oddziaływaniem charakteryzuje się przyrost długości rdzenia.

W analizie graficznie zinterpretowanej na rysunku 5, założono stałość średnicy wewnętrznej rdzenia, a przyrosty długości rdzenia rekompensowano zmianami średnicy zewnętrznej tak, aby uzyskiwać stałą objętość (2 cm^3). Przeprowadzona



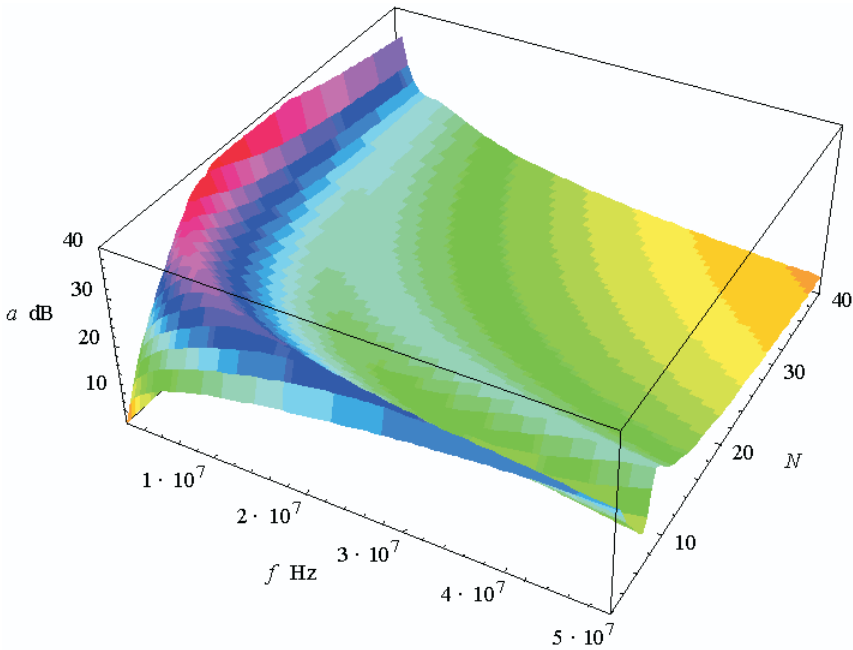
Rys. 5. Zmiany długości rdzenia o stałej przenikalności początkowej $\mu_i = 30\,000$, (D_{zew} oraz $D_{wew} = \text{const.}$) [1]

symulacja wykazuje wzrost wartości funkcji w początkowym zakresie częstotliwości i zmniejszenie w zakresie drugiego maksimum.

Uzwojenie to specyficzna część dławika. Zakładając stałą objętość rdzenia, wydaje się, że jedynym ograniczeniem liczby zwojów dławika staje się fizyczne umieszczenie ich w skończonej średnicy wewnętrznej rdzenia. Niestety, nie jest to jedyne ograniczenie. Jak wykazano w przeprowadzonych badaniach z uzwojeniami powiązane jest zjawisko pasożytniczej pojemności. Jej wpływ jest na tyle duży, że przy liczbie 40-60 zwojów znacząco degradowana jest indukcyjność dławika, a co za tym idzie jego tłumienność wtrąceniowa. Symulację zmian liczby zwojów prezentuje rysunek 6.

Dla określonej liczby zwojów (w rozważanym przypadku $N \sim 20$) widoczne jest lokalne ekstremum, które jest wynikiem istnienia rezonansu pomiędzy reaktancją indukcyjną dławika a reaktancją pojemności pasożytniczej uzwojenia. Generalnie, w zakresie megahercowym wraz ze wzrostem liczby zwojów ekstremum przyjmuje większe wartości i jednocześnie występuje już przy niższych częstotliwościach. Dalsze zwiększanie ($N > 20$) liczby zwojów powoduje zmniejszanie wartości pierwszego ekstremum i jednoczesne zniesienie drugiego ekstremum.

Ważnym etapem rozważań tłumienności wtrąceniowej rdzenia jest określenie wpływu czynników zewnętrznych na jej wartość. W pierwszej kolejności poddano analizie zmiany temperatury.

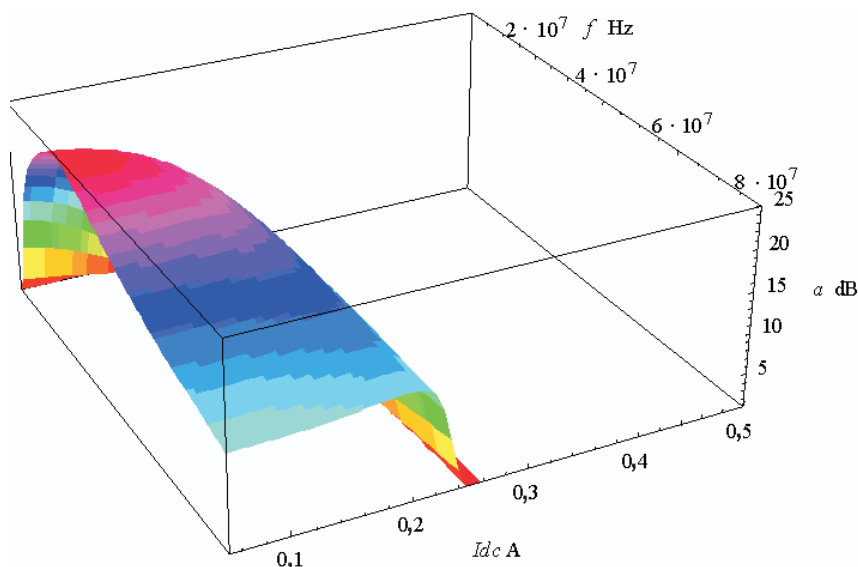


Rys. 6. Wpływ liczby zwojów na tłumienność wtrąceniową rdzenia (geometria rdzenia = const.) [1]

Ze wzrostem temperatury zachowanie magnetyków może być różne. Przenosząc rozważania na konkretne typy magnetyków można określić wpływ zmian temperatury na tłumienność rdzenia. Najlepszą stabilność przenikalności względem temperatury mają stopy amorficzne i nanokrystaliczne. Cechuje je tylko kilkuprocentowy dryft odniesiony do względnej zmiany przenikalności $\mu(T)/\mu(20^\circ\text{C})$. Badany w pracy magnetyk, Vitroperm 500F ma dodatni współczynnik α_T zmian przenikalności początkowej odniesiony do zmian temperatury. Rozważania dotyczące ferrytów wykazują nieliniowe zmiany przenikalności i dodatkowo definiują mniejszy zakres stosowności. Standardowo praca ferrytu planowana jest do $\sim 0,8 T_{\text{Curie}}$, czyli ok 100°C .

Najlepsze parametry stopu nanokrystalicznego przekładają się m.in. na przewidywalność zmian warunków pracy w obwodzie już w fazie projektowania urządzeń przeciwwzakłóceńowych. Natomiast w przypadku ferrytów zmiany są największe. Przeciwdziałać im można jedynie poprzez zawężenie zakresu temperatury pracy rdzenia.

Kolejnym czynnikiem oddziałującym na tłumienność wtrąceniową rdzenia jest podmagnesowanie rdzenia. Obecność prądu stałego w uzwojeniu dławika powoduje powstanie pola wstępnie magnesującego rdzeń magnetyczny. Zmiana wartości przenikalności magnetycznej pociąga za sobą zmiany indukcyjności dławika, a więc także tłumienności a .

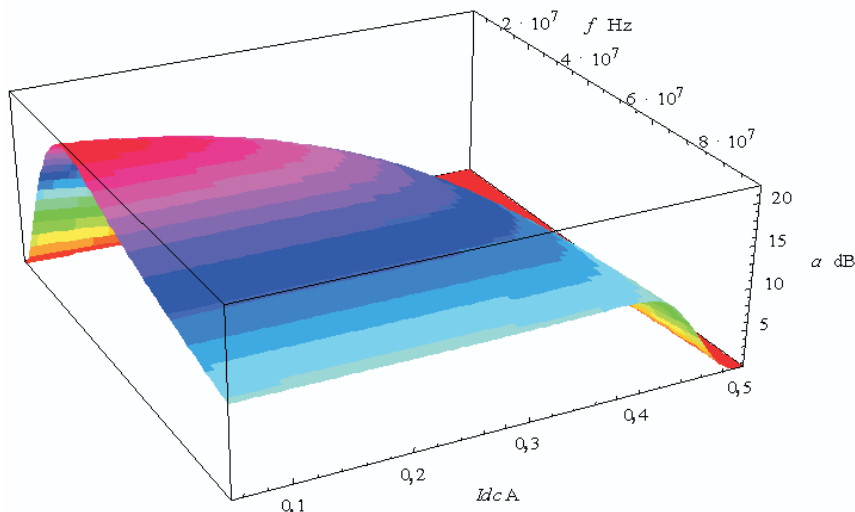


Rys. 7. Wpływ zmian pola stałego na tłumienność wtrąceniową [1]

Przy dużych wartościach natężenia prądu występuje zjawisko nasycenia materiału rdzeniowego. W przypadku zaistnienia podmagnesowania w modelu dławika należy zastosować wartość przyrostową przenikalności — tzw. przenikalność rewersyjną μ_{rew} . Dla wartości zerowej prądu stałego przenikalność rewersyjna przyjmuje wartość przenikalności początkowej. Przy pojawieniu się niewielkich wartości prądu przenikalność wzrasta, osiągając lokalne maksimum. Dalszy wzrost prądu skutkuje dynamicznym spadkiem przenikalności poniżej wartości μ_i .

Zwiększenie pola podmagnesowującego degradowuje znacząco tłumienność wtrąceniową w całym zakresie rozpatrywanych częstotliwości. Przeciwdziałać temu można dwojako. Po pierwsze, możliwe jest zastosowanie lepszego magnetyka, o większej odporności na podmagnesowanie (np. nanokrystalika o mniejszych wartościach przenikalności). Drugi sposób to zastosowanie szczeliny powietrznej, ale ze względów konstrukcyjnych dotyczy jedynie ferrytów. Wprowadzając szczelinę powietrzną w rdzeniu dławika, uzyskuje się znaczącą odporność na podmagnesowanie, zmienia się bowiem wypadkowa przenikalność całego obwodu magnetycznego.

Jak widać, uzyskane wyniki modelowania potwierdziły teoretyczne rozważania. Wprowadzenie szczeliny o szerokości 0,05 mm wywołało z jednej strony spadek uzyskiwanego tłumienia (punkt maksimum na rysunku 7 > 25 dB, a na rysunku 8, $\alpha < 20$ dB) przy niewielkich wartościach prądu podmagnesowania, z drugiej wyraźnie zwiększyło zakres pracy dławika przy wyższych wartościach prądu I_{DC} (wzrost z ok. 0,2 do 0,4 A).



Rys. 8. Tłumienność wtrąceniowa rdzenia ze szczeliną, przy różnych wartościach prądu stałego [1]

Kryteria przydatności materiałów magnetycznych na rdzenie dławików przeciwzakłóceńowych

Kryteria przydatności materiałów magnetycznie miękkich w aplikacjach ograniczających zaburzenia elektromagnetyczne należy rozpatrywać przede wszystkim pod względem istniejących w obwodzie elektrycznym zakłóceń elektromagnetycznych. Jednocześnie należy pamiętać o tym, że warunki wyboru zarówno materiału magnetycznego, jak i samego rdzenia są ze sobą mocno zintegrowane.

Właściwości tłumiące dławika przeciwzakłóceńowego są określane jego impedancją lub wynikającą z niej tłumiennością wtrąceniową. Ich relacje określa się w umownym zakresie częstotliwości 9 kHz - 30 MHz. Z racji występowania dużej liczby urządzeń elektrycznych z propagującymi w układach zasilania zakłóceniami o częstotliwościach sięgających setek megaherców, w pracy podjęto próbę rozszerzenia zakresu analizy użyteczności dławików do 300 MHz.

Uzyskanie zakładanej skuteczności ograniczania zaburzeń dławikiem przeciwzakłóceńowym, zdaniem autora, należy uzależnić od:

- rodzaju sygnału zakłócającego,
- zakresu częstotliwości i formy występujących zaburzeń,
- wymiarów przestrzeni przeznaczonych do zamontowania dławika,
- warunków otoczenia określonych m.in. temperaturą i odmagnesowaniem,
- wartości impedancji występujących w analizowanym obwodzie z dławikiem,
- stopnia tłumienia sygnałów zakłócających.

Każdy z tych czynników jest uwzględniony w proponowanym przez autora matematycznym modelu dławika. Wyjściowymi parametrami materiału rdzeniowego stały się: początkowa przenikalność magnetyczna, maksymalna indukcja magnetyczna, rezystywność, objętość.

Wysunięty przez autora system określania przydatności magnetyków na rdzenie dławików wyłania wyraźne relacje różnych typów materiałów magnetycznych. Podstawą do wszelkich badań i symulacji była magnetyczna przenikalność początkowa, określona w zakresie częstotliwości kilo- i megahercowych. Jak wykazano [1], materiał nanokrystaliczny w początkowej części charakterystyki częstotliwościowej ma największe wartości tłumienności i osiąga jednocześnie „łagodne” ekstremum. Specyficzne właściwości ferrytu powodują natomiast najbardziej dynamiczny wzrost i osiągnięcie najwyższej wartości tłumienności. Takie zależności pozwalają na wybór ferrytu do aplikacji przeciwzakłóceńowej pracującej w obwodach sygnałowych, gdzie „odległości” pasma sygnału użytecznego do pasma sygnałów zakłóceń są bliskie — porównanie narastania zbroczy krzywej tłumienności względem sygnałów.

Wraz ze zwiększeniem częstotliwościowego zakresu tłumienia zakłóceń powyżej 30 MHz, materiały nanokrystaliczne i ferryty manganowe coraz słabiej ograniczają zakłócenia, natomiast amorfiki w kilku próbach zupełnie zatraciły takie zdolności. Sytuację ratują ferryty NiZn, których zdolności zmniejszania zakłóceń sięgają do zakresu gigahercowego.

Pomiary tłumienności wtrąceniowej dławików

Końcowym etapem badań jest weryfikacja tłumienia zakłóceń wprowadzanego przez dławiki wytypowane w opisanym kryterium. W przypadku badań tłumienności wtrąceniowej dławików tor pomiarowy sprowadza się do zintegrowania układu zawierającego źródło zakłóceń — obiekt chroniony, dławik oraz miernik poziomu zakłóceń.

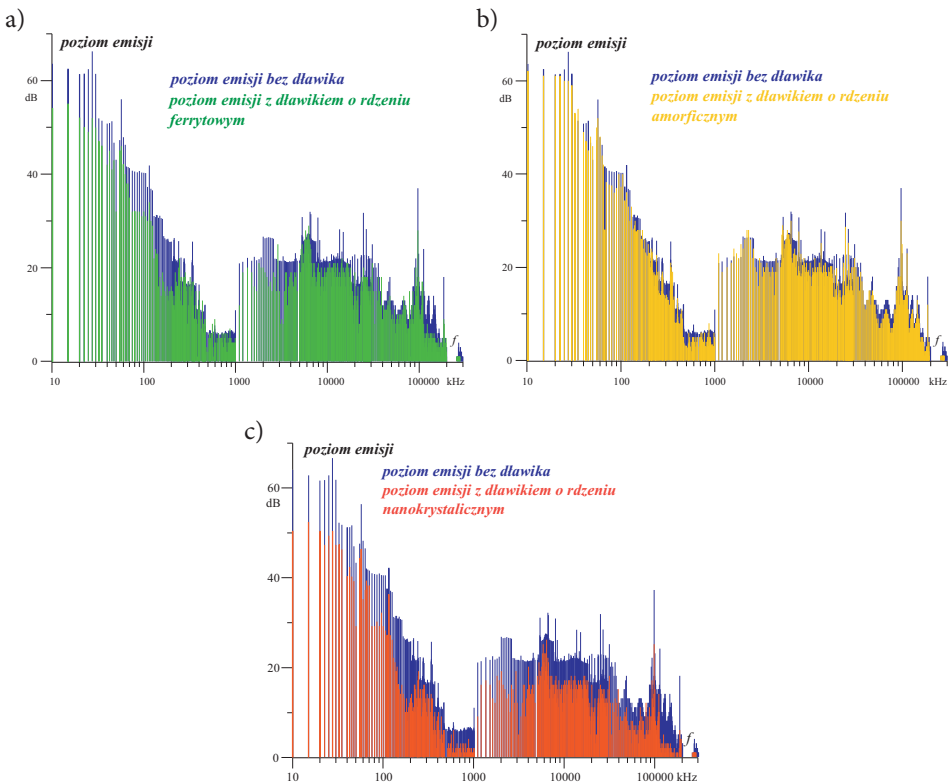
Uwzględniając wymagania kompatybilnościowe i zjawiska zachodzące przy propagacji zakłóceń w zakresie kilo— i megahercowych częstotliwości, opracowano w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, system pomiarowy składający się z dwóch sekcji, umożliwiających analizę tłumienności wtrąceniowej rdzeni [2, 3, 4]. Pierwszy układ pomiarowy umożliwia wykonywanie badań w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz, drugi układ dotyczy zakresu 30-300 MHz.

W systemie pomiarowym pracującym w zakresie 9 kHz-30 MHz pomiar napięcia zaburzeń może być zdefiniowany tylko wówczas, gdy zostanie zmierzony na określonej rezystancji (impedancji) obciążenia. Do tego celu jest wykorzystywana sieć sztuczna — LISN, która stabilizuje warunki pomiarów napięć zakłóceń w obwodzie zasilania testowanego obiektu. Analiza przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych w zakresie wyższych częstotliwości, tj. w zakresie 30-300 MHz,

wymaga badań opartych na metodzie wykorzystującej urządzenie pomocnicze zwane cęgami absorpcyjnymi. Metoda polega na pomiarze natężenia prądu zakłóceń płynącego w obwodzie: źródło zakłóceń → impedancja źródła zakłócenia → impedancja obciążenia w warunkach dopasowania.

Pomiary tłumienności wtrąceniowej dławików polegają na wyznaczeniu poziomu sygnału w przypadku pracującego i niepracującego dławika w obwodzie. Pierwszą wyznaczono charakterystykę emisji zaburzeń generowanych przez obiekt badany — impulsowy zasilacz komputerowy bez zabezpieczeń. W kolejnym etapie badań, pomiarom poddano zestaw rdzeni ferrytowych, amorficznych i nanokrystalicznych o różnych konfiguracjach gabarytowych i zwojowych, wytypowanych na podstawie opisanego kryterium.

Zaprezentowane wyniki dotyczą rdzeni umieszczonych w obudowie zasilacza, z nawiniętymi 5 zwojami. Uzyskane wartości potwierdzają, że najlepszym materiałem okazał się nanokrystaliczny Vitroperm 500F [1]. Uzyskane przy jego zastosowaniu wyniki okazują się najlepsze — prawie w całym zakresie badań wartości zakłóceń są



Rys. 9. Poziomy emisji impulsowego zasilacza z dławikami: a) ferrytowym; b) amorficznym; c) nanokrystalicznym [1]

najmniejsze. Wynik ten jest tym bardziej zadowalający, że objętość rdzenia użytego do badań spośród tych trzech zaprezentowanych była najmniejsza.

Wnioski

W pracy omówiono możliwość zastosowania nowoczesnych materiałów magnetycznie miękkich na rdzenie dławików przeciwzakłóceniovych. Analizie poddano trzy typy materiałów — nanokrystaliczny, amorficzny i ferryt.

Impedancja dławika przeciwzakłóceniewego wpływa na skuteczność ograniczania zaburzeń. Zaproponowany schemat zastępczy dławika przeciwzakłóceniewego poprawnie odwzorowuje pracę dławika ferrytowego, amorficznego i nanokrystalicznego. Model pozwala na szybką weryfikację kryteriów doboru materiału magnetycznego na rdzeń dławika przeciwzakłóceniewego.

Wykazane kryteria zostały potwierdzone pomiarowo. Dla analizowanego zasilacza komputerowego największą skutecznością tłumienia odznaczył się dławik nanokrystaliczny Vitroperm 500F. Wykazana przewaga zalet rdzeni nanokrystalicznych pozwala liczyć na nowe, wydajniejsze konstrukcje dławików przeciwzakłóceniovych.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] P. A. MAZUREK, *Wpływ właściwości materiałów magnetycznych rdzeni dławików przeciwzakłóceniovych na skuteczność filtrowania zakłóceń przewodzonych*, rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2007.
- [2] P. A. MAZUREK, A. WAC-WŁODARCZYK, *Wpływ przenikalności magnetycznej rdzeni dławików przeciwzakłóceniovych na tłumienność wtrąceniową*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 9, 2007, 73-75.
- [3] A. WAC-WŁODARCZYK, P. A. MAZUREK, *Nanokrystaliczne dławiki przeciwzakłóceniove*, XVII Sympozjum PTZE, Rydzyna, czerwiec 2007, 145-147.
- [4] A. WAC-WŁODARCZYK, P. A. MAZUREK, *Analiza tłumienności wtrąceniowej rdzeni ferrytowych i nanokrystalicznych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12, 2005, 19-22.
- [5] Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC), *Katalog produktów 2000-2006*, <http://www.vacuumschmelze.com>.

P. A. MAZUREK

Analysis of insertion loss of EMI Cores

Abstract. The article presents an analysis of the insertion loss of cores and EMI chokes. Expansion, parallel equivalent circuit diagram was proposed (parasitic elements). The complex magnetic permeability of a core in a model was contained. The part of article presents verification of simulation with measurements.

Keywords: EMC, EM interferences, EMI choke, nanocrystalline cores

Universal Decimal Classification: 537.8

