

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ



Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. Nadbystrzycka 38A

20-618 Lublin

mgr inż. Egor Gurov

Metoda projektowania analogowych filtrów na zakres ultrakrótkich fal radiowych na elementach skupionych

*Promotor:
prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik*

*Promotor pomocniczy:
dr inż. Tomasz Ławicki*



Politechnika Lubelska
Lublin 2020

Ogólna charakterystyka pracy

Aktualność tematu

Analogowe filtry są ważną częścią odbiorników radiowych i urządzeń nadawczych. Są one stosowane jako preselektory w obwodach wejściowych odbiorników radiowych, na łączach superheterodyny dla tłumienia lustrzanego kanału i innych niepożądanych składowych intermodulacji w widmie sygnału. Przy pracy z przetwornikami analogowo-cyfrowymi i cyfrowo-analogowymi niezbędnym jest wydzielenie wymaganej strefy Nyquista.

Teoria syntezy filtrów analogowych o parametrach rozłożonych dla bardzo wysokich częstotliwości ma dobrą podbudowę w związku z szerokim zastosowaniem w celach komercyjnych: łączność mobilna, łączność satelitarna, nawigacja, bezprzewodowe interfejsy, takie jak Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, itp.

W obszarze bardzo wysokich częstotliwości (BWC, 30÷300 MHz) długość fali przyjmuje wartość od 1 do 10 metrów, co prowadzi do dużych rozmiarów filtrów o parametrach rozłożonych, ponieważ ich rozmiary są współmierne z długością fali. Dlatego, filtry analogowe w tym zakresie, powinny być budowane na pasywnych elementach skupionych, takich jak cewki indukcyjne i kondensatory.

Ten zakres częstotliwości wykorzystywany był wcześniej głównie dla nadawania tele- i radiowego, gdzie nie pojawiały się wysokie wymagania związane z czułością odbiorników radiowych i poziomem niepożądanego emisji przekaźników radiowych. Doprowadziło to do braku konieczności stosowania analogowych filtrów wysokiej selektywności i, jako następstwo, w obecnym czasie ten zakres częstotliwości wykorzystywany jest w urządzeniach specjalnych: sprzęt radiokomunikacyjny, sprzęt poszukiwawczy i ratowniczy, radiolokacja i radionawigacja, co pokazuje na znaczenie tego zakresu częstotliwości, a także konieczność sformułowania bardziej wysokich wymagań dotyczących jakości aparatury nadawczo-odbiorczej.

Zakres pracy

W pierwszej połowie XX wieku znaczący wkład w rozwój teorii syntezy analogowych filtrów wnieśli tacy uczeni jak: Ronald Martin Foster, Stefan Butterworth, Wilhelm Kajer i inni. W drugiej połowie XX wieku napisano wiele książek poświęconych tej tematyce, np. prace Richarda Danielsa, Steva Windera, Garii Lema, itp. Wszystkie one wykorzystują metodę aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej, polegającej na aproksymacji charakterystyki częstotliwościowej filtra funkcją transmitacji w postaci analitycznej, z której uzyskuje się układ i nominalne wartości parametrów wykorzystywanych komponentów.

Dzisiaj proces syntezy filtrów jest na tyle zautomatyzowany, że realizowany jest przy pomocy komercyjnych programów, takich jak Math Works – Matlab, Nuhartz Technologies – Filter Solutions, Keysight Technologies – Genesys, Advanced Design System, Spectrum Software – Micro – Cap i inne. One także wykorzystują metodę aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej.

Zastosowanie elementów tiuningowych komplikuje produkcję seryjną aparatury, zawierającej filtry analogowe, w związku z koniecznością wykorzystywania aparatury kontrolno-pomiarowej, personelu dostrajającego, co z kolei pociąga za sobą zwiększenie nakładów finansowych i straty czasowe. Układ z komponentami tiuningowanymi posiada

obniżoną stabilność na działanie czynników zewnętrznych, takich jak drżenie, wibracje, wahania temperatury, co z kolei jest szczególnie krytyczne dla aparatury stosowanej na pokładzie samolotów, czy helikopterów.

Pojawia się problem, polegający na tym, że dla spełnienia wymagań przy projektowaniu analogowych filtrów bardzo wysokiej częstotliwości na rzeczywistych komponentach o minimalnych wartościach, nie wymagających tuningu, brak jest w chwili obecnej metod i środków efektywnego rozwiązania takiego zadania.

Obiekt badań: proces projektowania analogowych filtrów bardzo wysokiej częstotliwości.

Przedmiot badań: metoda projektowania analogowych filtrów bardzo wysokiej częstotliwości, model matematyczny i algorytm obliczeń wartości nominalnych parametrów komponentów filtra, a także oprogramowania procesu jego projektowania.

Cel pracy: podwyższenie efektywności projektowania analogowych filtrów bardzo wysokiej częstotliwości na elementach skupionych i dostrajanych (tuningowanych).

Dla osiągnięcia postawionego celu w rozprawie doktorskiej zostały zrealizowane następujące zadania:

1. Przegląd i analiza metod projektowania filtrów analogowych.
2. Opracowanie metody projektowania filtrów BWCz wykonywanych na elementach skupionych.
3. Ocena wpływu pasożytniczych parametrów komponentów i topologii filtra na jego charakterystykę częstotliwościową.
4. Opracowanie modelu matematycznego i algorytmu wyznaczania nominalnych wartości parametrów komponentów filtrów analogowych.
5. Opracowanie algorytmu dla oceny tolerancji parametrów komponentów filtra.
6. Opracowanie metodyki projektowania filtrów analogowych na podstawie symulacji komputerowych.
7. Testowanie, weryfikacja eksperymentalna i wdrożenie rezultatów badań.

Nowość naukowa:

1. Opracowana metoda projektowania analogowych filtrów różni się od metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej zastosowaniem dokładniejszego modelu matematycznego, co z kolei pozwala skrócić czas strojenia i regulacji prototypów oraz przy seryjnej produkcji urządzeń, w wyniku rezygnacji z dostrajanych (tuningowanych) komponentów.
2. Opracowanie modelu matematycznego filtrów analogowych różniące się od modelu otrzymanego metoda aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej, dzięki uwzględnieniu wpływu tolerancji parametrów komponentów i topologii płytki drukowanej, co pozwala na zmniejszenie błędów symulacji.
3. Opracowanie algorytmu obliczeniowego nominalnych wartości parametrów komponentów filtra analogowego na uzyskanie wymaganej charakterystyki częstotliwościowej.
4. Opracowanie algorytmu wyznaczającego wymagane tolerancje nominalnych parametrów komponentów filtrów analogowych.

5. Na podstawie symulacji komputerowej została zaproponowana inżynierska metodologia projektowania filtrów analogowych bez stosowania dostrajanych (tuningowanych) elementów, która uwzględnia tolerancję parametrów komponentów i topologię płytki drukowanej.

Znaczenie teoretyczne polega na rozwoju teorii projektowania analogowych filtrów radiowych na zakres bardzo wysokich częstotliwości, wykonanych na elementach skupionych o nieregulowanych parametrach. Uwzględnione są tu charakterystyki pasożytnicze, tolerancje i topologia filtra.

Znaczenie praktyczne:

1. Zaproponowana metodologia projektowania filtrów analogowych pozwala uprościć i przyspieszyć proces ich konstrukcji.
2. Brak komponentów dostrajanych w zestawie filtrów analogowych zmniejsza nakłady czasowe i finansowe przy seryjnej produkcji aparatury radioelektronicznej.
3. Opracowana metoda pozwala zwiększyć odporność na czynniki zewnętrzne, takie jak wibracje i wahania temperatury, co jest bardzo ważne dla pokładowych przyrządów elektronicznych w samolotach.

Metodologia i metody badawcze

Dla rozwiązania postawionych zadań wykorzystywane były metody modelowania matematycznego, a w szczególności metody optymalizacji dyskretnej, metoda Monte-Carlo, metoda momentów dla modelowania elektromagnetycznego z wykorzystaniem funkcji Greena, a także metoda aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej dla syntezy filtrów. Wiarygodność uzyskanych rezultatów była oceniana metodą porównania danych eksperymentalnych z danymi symulacyjnymi.

Rezultaty, które zostały uzyskane w pracy:

1. Metoda projektowania filtrów analogowych pozwala skrócić sumaryczny czas projektowania z kilku dni do kilku godzin, w wyniku eliminacji konieczności regulacji prototypu.
2. Opracowany model matematyczny filtra pozwala zwiększyć dokładność syntezy charakterystyki wyjściowej rzeczywistego urządzenia 5-10 razy.
3. Algorytm dyskretnego obliczania parametrów nominalnych komponentów zmniejsza czas wyznaczania dopuszczalnych rezultatów, w porównaniu z metodą pełnego przeszukiwania, w stosunku do dopuszczalnego czasu, określanego przez użytkownika, w wyniku ograniczenia ilości zmian wartości nominalnych parametrów komponentów i ilości zmiennych komponentów.
4. Przedstawiona metodologia pozwala projektować filtry analogowe na bardzo wysokie częstotliwości, które nie wymagają dostrojenia, przy wykorzystaniu produkowanej przemysłowo bazy elementowej.

Rezultaty pracy były przedstawione na 8 konferencjach, w tym 5 międzynarodowych.

Struktura pracy

Praca składa się ze wstępu, czterech rozdziałów z wnioskami, spisu literatury i dodatków.

Treść pracy

We wstępie zostało przedstawione uzasadnienie aktualności tematu dysertacji i określony praktyczny kierunek uzyskanych wyników oraz logika wzajemnego powiązania rozdziałów w pracy.

Rozdział drugi to określenie tezy, celu i zakresu pracy.

Postawiona teza brzmi:

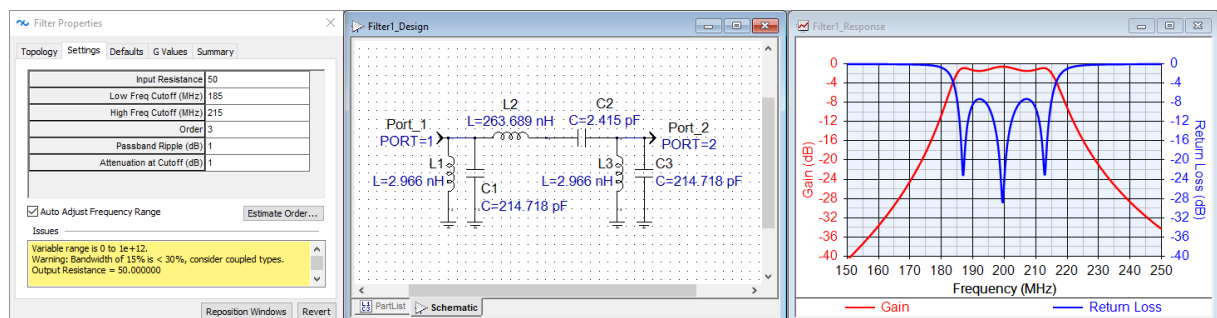
„zaproponowana metoda pozwoli obniżyć pracochłonność projektowania analogowych filtrów w zakresie fal ultrakrótkich, znacząco przyspieszyć i uprościć proces seryjnej produkcji dzięki wyeliminowaniu elementów strojonych”.

Zakres pracy obejmuje następujące zadania badawcze:

- 1) analiza przedmiotowego obszaru,
- 2) opracowanie modeli matematycznych filtrów analogowych,
- 3) opracowanie metody dyskretnej optymalizacji dla doboru wartości nominalnych badanych komponentów zgodnie z obowiązującym modelem matematycznym,
- 4) opracowanie metody optymalizacji parametrycznej na podstawie symulacji metodą Monte-Carlo,
- 5) akceptacja, sprawdzenie eksperymentalne i wdrożenie wyników.

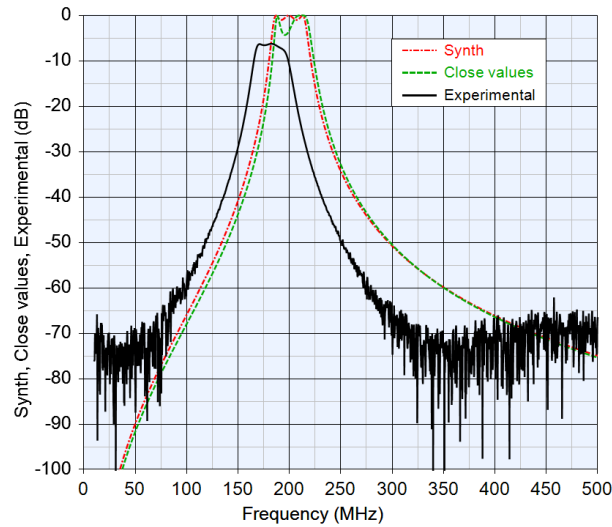
W trzecim rozdziale został przeprowadzony przegląd i analiza obszarów zastosowań filtrów analogowych. Przedstawione zostały podstawowe rodzaje filtrów wykorzystywanych w zakresach częstotliwości radiowych. Krótko przeanalizowana została, szeroko rozpowszechniona metoda aproksymacji charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej, omówione jej niedostatki i przedstawione sformułowanie zadania.

Na rys. 1 przedstawiony jest wynik syntezy filtra pasmowego 3 rzędu w programie Keysight Genesys. Częstotliwość środkowa równa 200 MHz, pasmo 30 MHz.



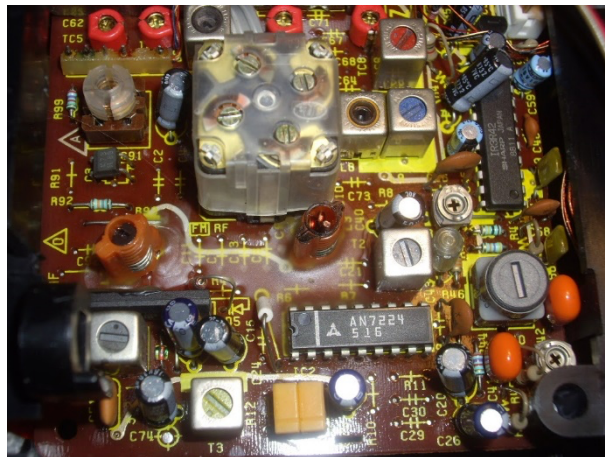
Rys. 1. Przykład syntezy filtra analogowego w programie Keysight Genesys

Praktyczna realizacja tego filtra jest trudna. Występują „niewygodne” nominalne wartości elementów składowych. Produkowane przemysłowo cewki indukcyjne i kondensatory, mają wartości ze standardowego szeregu. Oprócz tego, każdy komponent ma tolerancję dla nominalnej wartości parametrów. Metoda aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej sugeruje wykorzystanie komponentów idealnych, nie uwzględnia parametrów pasożytniczych, wpływu topologii, co powoduje znaczący wpływ na charakterystykę częstotliwościową. Przykład przedstawiony jest na rys. 2, gdzie wynik zamiany wartości nominalnych parametrów elementów składowych na wartości najbliższe za standardowego szeregu „close values” i wynik eksperymentalny „experimental”.



Rys. 2. Przykład projektowania filtra analogowego metoda aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej

Wcześniej dla rozwiązania tego zadania stosowane były dostrojone komponenty, jak pokazano na rys. 3. Takie wykonanie wymaga dostępności aparatury kontrolno-pomiarowej, personelu dla regulacji, co z kolei zwiększa czasowe i finansowe koszty przy seryjnej produkcji aparatury. Uzyskana tą drogą konstrukcja ma zmniejszoną stabilność przy działaniu zewnętrznych zakłóceń, takich jak drżenie, wibracja, zmiany temperatury, co jest szczególnie krytyczne dla aparatury przeznaczonej do pracy w samolotach.

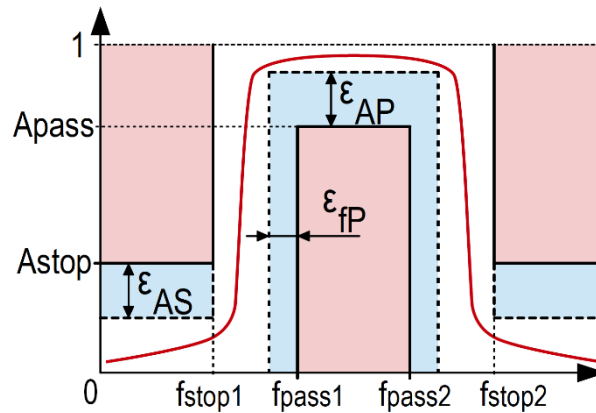


Rys. 3. Fotografia modułu radioczęstotliwościowego w przenośnym układzie stereo Sharp WF-939Z

W ten sposób, dla realizacji filtrów BWCz, z założoną charakterystyką częstotliwościową, koniecznym jest wykorzystywanie pasywnych filtrów LC o elementach skupionych.

Rozpatrzone zostanie sformułowanie zadania projektowania na przykładzie filtra pasmowego. Charakteryzuje się on pasmem przepuszczania $f_{pass1} \div f_{pass2}$, pasmem zaporowym $0 \div f_{stop1}$ i $f_{stop2} \div f_{max}$, gdzie f_{max} – maksymalna rozpatrywana częstotliwość, w przypadku ogólnym, nieskończoność; maksymalne dopuszczalne tłumienie w paśmie przepuszczania

A_{pass} i minimalne dopuszczalne tłumienie w paśmie zaporowym A_{stop1} i A_{stop2} . Ilustracja dla filtra pasmowego przedstawiona jest na rys. 4. Dla pasywnego filtra LC wielkość A_{pass} i A_{stop} znajdują się w obszarze od 0 do 1 lub mniej niż 0 dB.



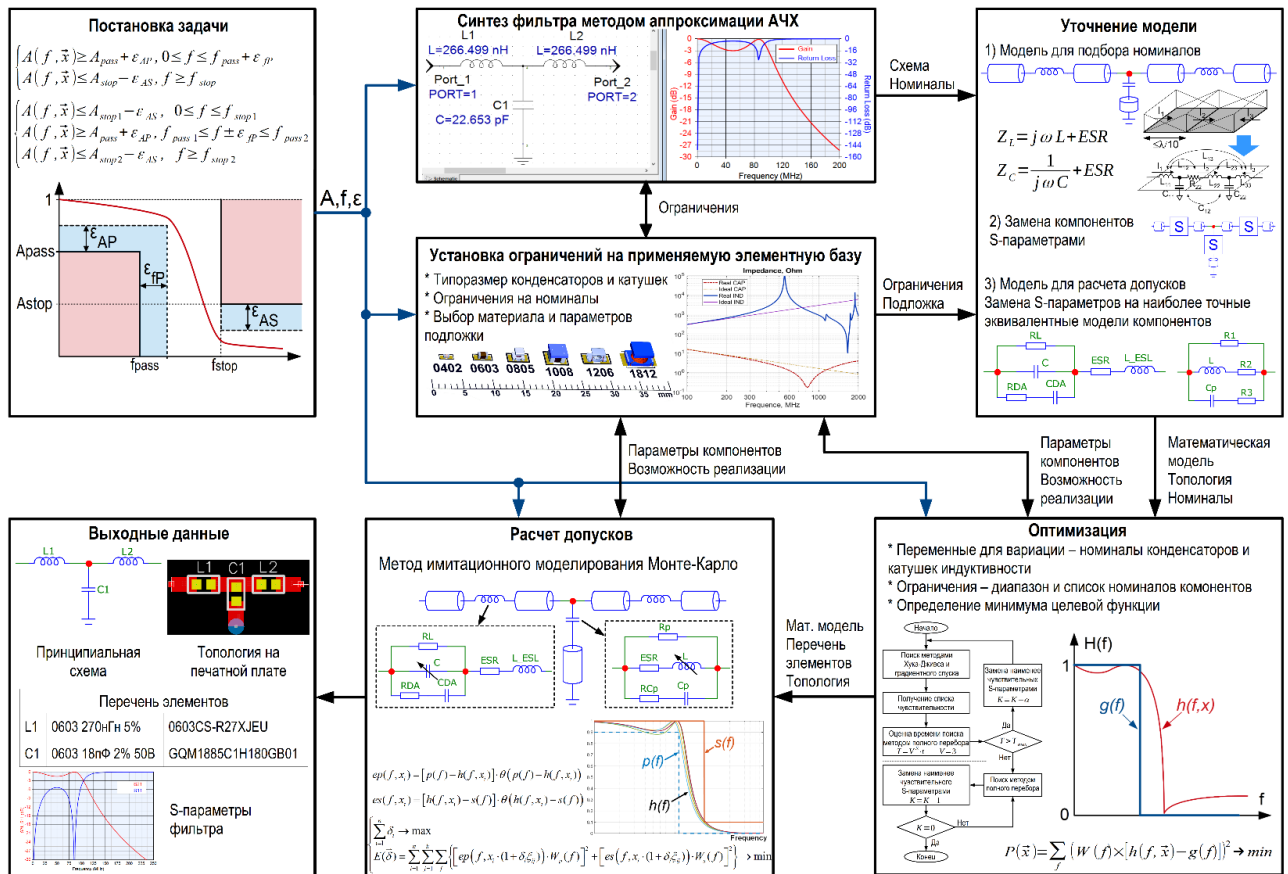
Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa filtra pasmowego

Wymagania określone dla charakterystyki częstotliwościowej można zapisać w postaci:

$$\begin{cases} A(f, \vec{x}) \leq A_{stop1} - \varepsilon_{AS}, & f_{min} \leq f \leq f_{stop1} \\ A(f, \vec{x}) \geq A_{pass} + \varepsilon_{AP}, & f_{pass1} - \varepsilon_{fP} \leq f \leq f_{pass2} + \varepsilon_{fP} \\ A(f, \vec{x}) \leq A_{stop2} - \varepsilon_{AS}, & f \geq f_{stop2} \end{cases}, \quad (1)$$

Proces projektowania filtra analogowego polega na znalezieniu takich dyskretnych nominalnych wartości X^i , przy których charakterystyka częstotliwościowa będzie odpowiadać przedstawionym wymaganiom.

W rozdziale czwartym przedstawiona jest metoda projektowania filtrów analogowych, pozwalająca na to, aby wziąć pod uwagę niedostatki metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej w zakresie BWCz. Przedstawione zostały modele matematyczne filtrów analogowych. Dla rozwiązania postawionego zadania projektowania analogowego filtra zaproponowana została metoda, którą przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Metoda projektowania filtrów analogowych

Oznaczenie bloków:

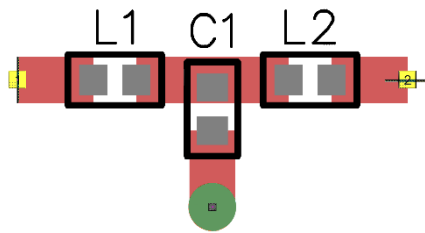
- 1- sformułowanie zadania
- 2- synteza filtra metodą aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych
- 3- sformułowanie ograniczeń dla przyjętej bazy elementowej
- 4- dokładniejszy model
- 5- dane wyjściowe
- 6- obliczenie tolerancji
- 7- optymalizacja

Metoda ta wykorzystuje udoskonalenie modelu matematycznego, uzyskanego przy zastosowaniu metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej, wyznaczeniu nominalnych wartości pochodzących z dyskretnego szeregu wartości, pozwalających na uzyskanie odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej, obliczanie tolerancji nominalnych wartości parametrów komponentów.

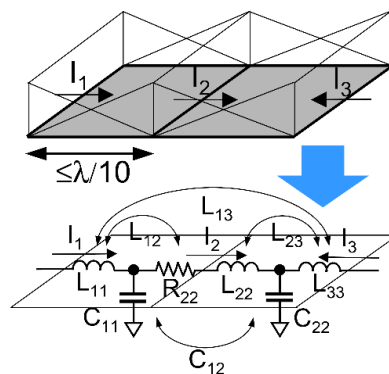
Jako pierwsze przybliżenie wykorzystywany jest wynik syntezy filtra metodą aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej. Przy projektowaniu urządzeń elektronicznych, zawsze występują w praktyce ograniczenia wiążące się z dostępnością do bazy elementowej. Są to ograniczenia dotyczące zakresu dostępnych nominalnych wartości dla każdego układu, który ograniczony jest od dołu parametrami pasożytniczymi, a z góry – własnymi częstotliwościami rezonansowymi.

Na charakterystykę częstotliwościową filtrów w zakresie BWCz ma wpływ topologia płytek drukowanych. Model mikropaskowej linii nie jest tak efektywny, jak analiza elektromagnetyczna. Do tego dobrze nadaje się metoda momentów ze względu na topologię

dwuwymiarową , co pozwala zmniejszyć czas obliczeń i w rezultacie, mamy model matematyczny, który został przedstawiony na rys. 6 i 7 na przykładzie filtra dolnoprzepustowego 3 rzędu.

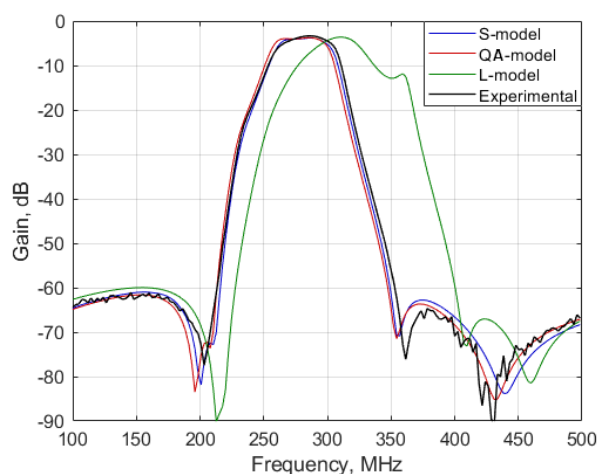


Rys. 6. Model topologiczny filtra analogowego



Rys. 7. Model elementu topologii

Przeprowadzona została ocena dokładności modeli na przykładzie pasmowego filtra 5 rzędu. Za wiarygodną charakterystykę przyjęto wyniki eksperymentalne, uzyskane przy pomocy wektorowego analizatora Rohole & Schwarz ZVA-8. Rozpatrzone zostały 3 modele: L-model – model liniowy filtra analogowego, który można uzyskać przy pomocy metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej (prosty model). QA-model – uwzględnione czynniki jakościowe i efektywne wartości parametrów komponentów, wpływ podłoża i topologii przy pomocy analizy elektromagnetycznej. S-model – analogiczny do QA-modelu, gdzie zamiast modeli komponentów wprowadzono S-parametry. Wyniki zostały przedstawione na rys. 8.



Rys. 8. Eksperymentalne i obliczeniowe charakterystyki częstotliwościowe filtra analogowego

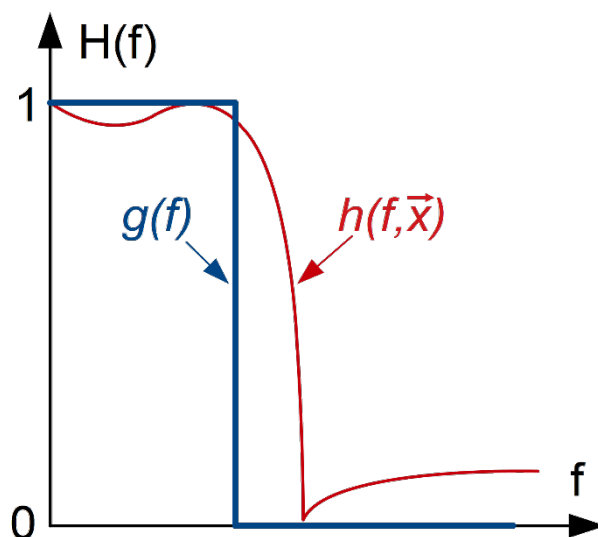
Piąty rozdział zawiera opis algorytmu wyznaczania nominalnych wartości parametrów komponentów, metodą obliczenia tolerancji wartości nominalnych, a także metodologię projektowania filtrów analogowych, której podstawy zostały przedstawione w poprzednim rozdziale.

Wyszukiwanie komponentów pozwalających na uzyskanie preferowanej charakterystyki częstotliwościowej, proponuje się przeprowadzić metodą optymalizacji. Zmiennymi dla odmiany występują nominalne wartości indukcyjności cewek i pojemności komponentów. Funkcja celu przyjmuje następującą postać:

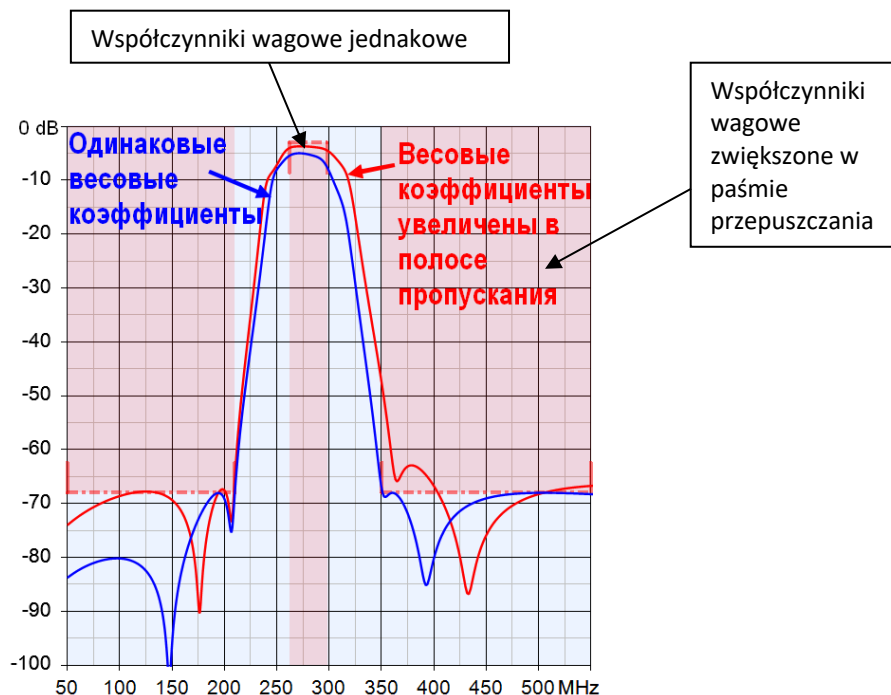
$$P(\vec{x}) = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} (W(f) \times [h(f, \vec{x}) - g(f)])^2 \rightarrow \min \quad , (2)$$

gdzie: $W(f)$ – współczynnik wagi,
 $h(f, \vec{x})$ – współczynnik modelowania,
 $g(f)$ – charakterystyka częstotliwości idealnego filtra.

Objaśnienia przedstawione zostały na rys. 9 i 10.



Rys. 9. Wyjaśnienia dotyczące przyjętej funkcji celu, na przykładzie filtra dolnoprzepustowego



Rys. 10. Wyniki optymalizacji z różnymi współczynnikami wagowymi

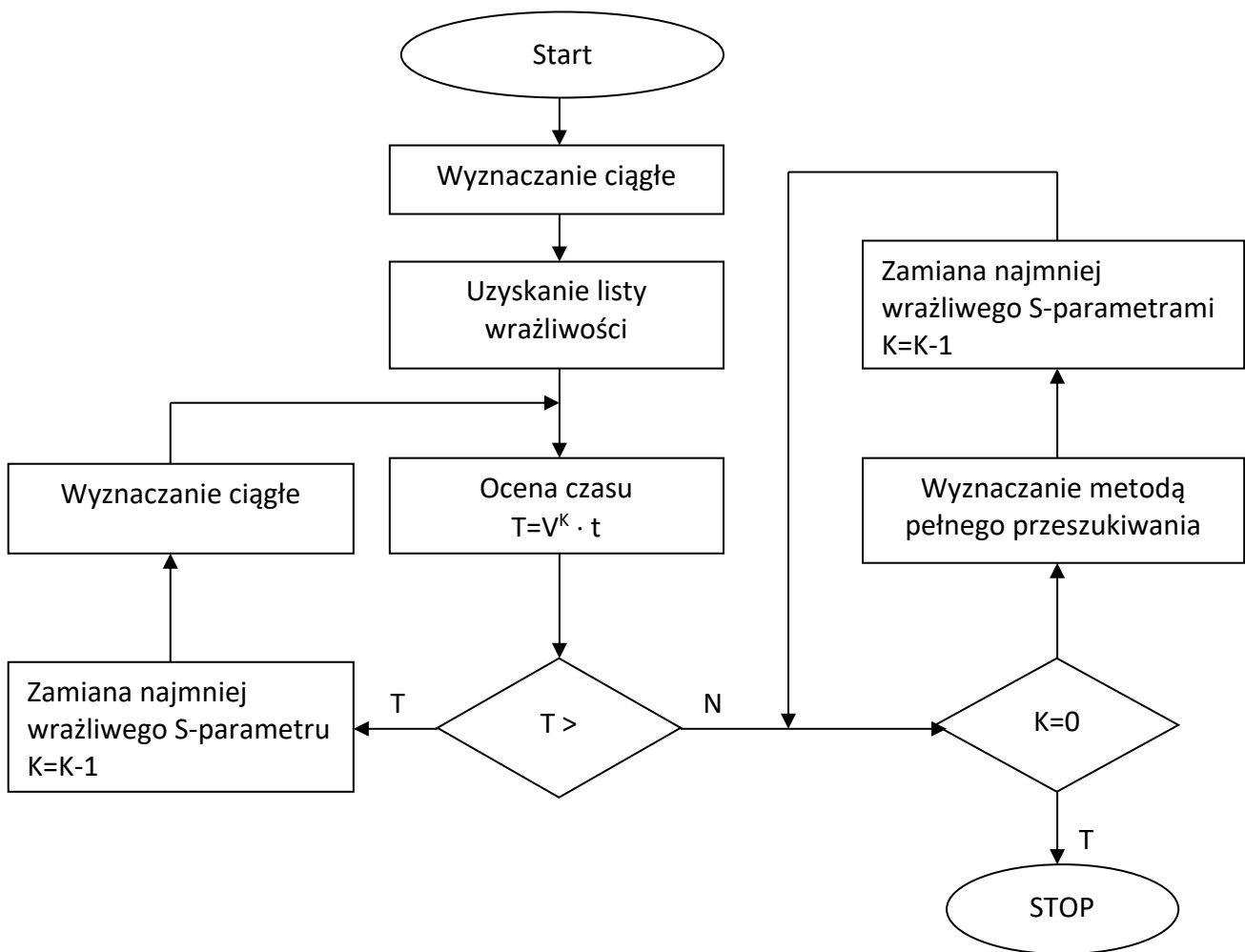
Współczynniki wagowe są początkowo równe dla każdej częstotliwości. W procesie uzyskiwania minimum funkcji celu, może być wymagana ich korekta w celu uzyskania mniejszego błędu w konkretnym paśmie częstotliwości, np. w paśmie przepuszczania, jak pokazano na rys. 10.

Ponieważ nominalne parametry komponentów mogą mieć wartość tylko z dyskretnego szeregu, koniecznym jest zastosowanie optymalizacji dyskretnej. Jedną z nich jest metoda pełnego przeszukiwania. Liczbę możliwych wariantów można wyznaczyć wykorzystując zależność $N=V^K$, gdzie V – liczba wartości parametrów, a K – liczba komponentów. Czas pełnego przeszukiwania można ocenić stosując zależność $T=V^K \cdot t$, gdzie t – czas realizacji jednej interakcji. Przeprowadzona została ocena średniego czasu obliczeń jednego wariantu dla kilku typów filtra w programie Keysight Genesys 23018, przy wykorzystaniu PC z procesorem Intel i 7-3770 3,4 GHz. Wyniki przedstawione zostały w tablicy 1.

Tablica 1. Ocena czasu pełnego przeszukiwania

Rodzaj Filtra	V	K	N	t	T
Filtr dolnoprzepustowy 3 rzędu	3	3	27	200ms	5s
Filtr dolnoprzepustowy 3 rzędu	7	3	343	200ms	1min.
Filtr pasmowoprzepustowy 3 rzędu	3	6	729	500ms	6min.
Filtr pasmowoprzepustowy 3 rzędu	7	6	117649	500ms	17godz.
Filtr pasmowoprzepustowy 5 rzędu	3	14	4782969	700ms	39dni
Filtr pasmowoprzepustowy 5 rzędu	7	14	$6,8 \cdot 10^{11}$	700ms	15000lat

Metoda pełnego przeszukiwania dobrze nadaje się dla filtrów niskich rzędów przy niewielkiej ilości komponentów. Dla filtrów wyższych rzędów wymagany jest szybszy algorytm przeszukiwania, np. zaproponowany na rys. 11.



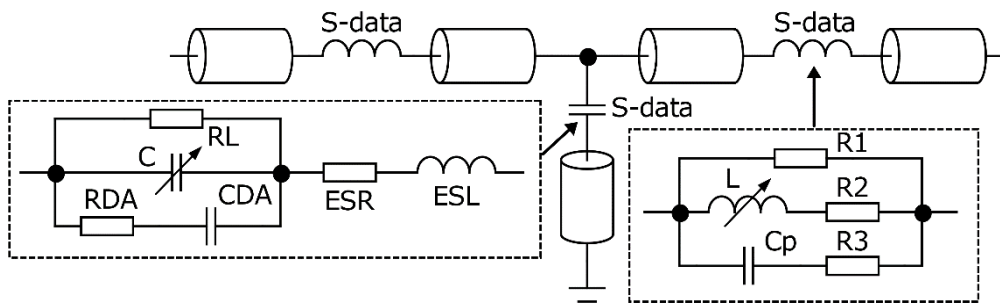
Rys. 11. Algorytm wyznaczania nominalnych wartości parametrów komponentów

Istnieje wiele metod ciągłego wyznaczania minimum funkcji celu. Metody gradientowe, Newtona (a także ich modyfikacje) wykorzystują pochodne funkcji. Do metod, niewykorzystujących pochodnych, można zaliczyć metody Haka-Jeevsa, Rosenbrocka i Davisa, Swenna, Campy, Powella.

Oprogramowanie, przy pomocy którego rozwiązuje się zadania wyszukiwania parametrów dopuszczalnych, powinno również zapewniać możliwość symulacji układów sieci o częstotliwościach radiowych oraz przeprowadzenia analizy elektromagnetycznej. Z praktycznego punktu widzenia, celowym jest rozpatrywać metody optymalizacji, realizowane już w takich programach.

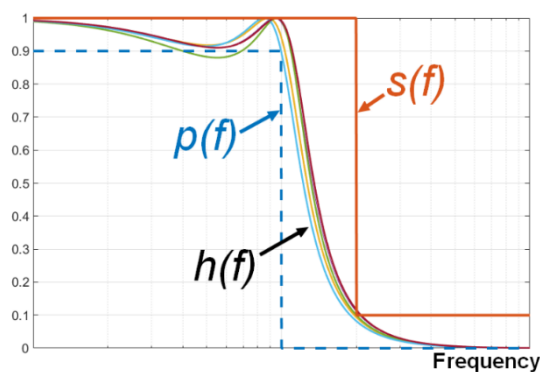
Wynikiem optymalizacji jest model filtra z możliwą do przyjęcia charakterystyką częstotliwościową i topologią na płytce drukowanej, której komponenty zostały zamienione na S-parametry.

Dla oceny dopuszczalnych odchyłeń wartości nominalnych proponuje się wykorzystać symulacyjną metodę Monte Carlo. S-parametry należy zamienić na dokładniejsze modele z regulowanymi parametrami. Przy przeprowadzaniu analizy metodą Monte Carlo, nominal parametrów podlega zmianom, parametry pasożytnicze pozostają stałe, ponieważ zmiana wartości nominalnej następuje w niewielkich przedziałach. Model filtra przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Przykład modelu analogowego filtra dla obliczenia tolerancji zmian wartości nominalnych parametrów

Po przeprowadzonej analizie uzyskujemy rodzinę charakterystyk częstotliwościowych filtra przy różnych tolerancjach każdego komponentu. Przykład pokazany jest na rys. 13.



Rys. 13. Rodzina charakterystyk częstotliwościowych, uzyskana przy pomocy metody Monte Carlo na przykładzie filtra dolnoprzepustowego

Wykorzystując warunki graniczne (1) można uzyskać funkcje ograniczające charakterystykę częstotliwościową z góry $s(f)$ i z dołu $p(f)$. Zadanie sprowadza się do wyznaczenia dopuszczalnej tolerancji nominalnych wartości parametrów komponentów, przy których zadany procent funkcji przenoszenia $h(f)$ znajduje się w przyjętych granicach.

Dla każdej częstotliwości f charakterystyki częstotliwościowej filtra $h(f, \vec{x}')$ oraz dla każdego komponentu x' , w każdej iteracji można określić wartość błędu pojawiającego się przy przekroczeniu obszaru ograniczeń:

$$\begin{aligned} ep(f, \vec{x}) &= [p(f) - h(f, \vec{x})] \cdot \theta(p(f) - h(f, \vec{x})); \\ es(f, \vec{x}) &= [h(f, \vec{x}) - s(f)] \cdot \theta(h(f, \vec{x}) - s(f)); \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: θ - funkcja Heaviside, określona następująco:

$$\theta(y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } y < 0 \\ 1 & \text{dla } y \geq 0 \end{cases}$$

w rezultacie, zadanie oceny dopuszczalnych odchyłek jest sformułowane w następujący sposób:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow \max \\ E(\vec{\delta}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_f \left\{ \left[ep(f, x_i \cdot (1 + \delta_i \xi_{ij})) \cdot W_p(f) \right]^2 + \left[es(f, x_i \cdot (1 + \delta_i \xi_{ij})) \cdot W_s(f) \right]^2 \right\} \rightarrow \min \end{cases}, (4)$$

gdzie: n – liczba komponentów w filtrze,

k – liczba iteracji w analizie Monte Carlo,

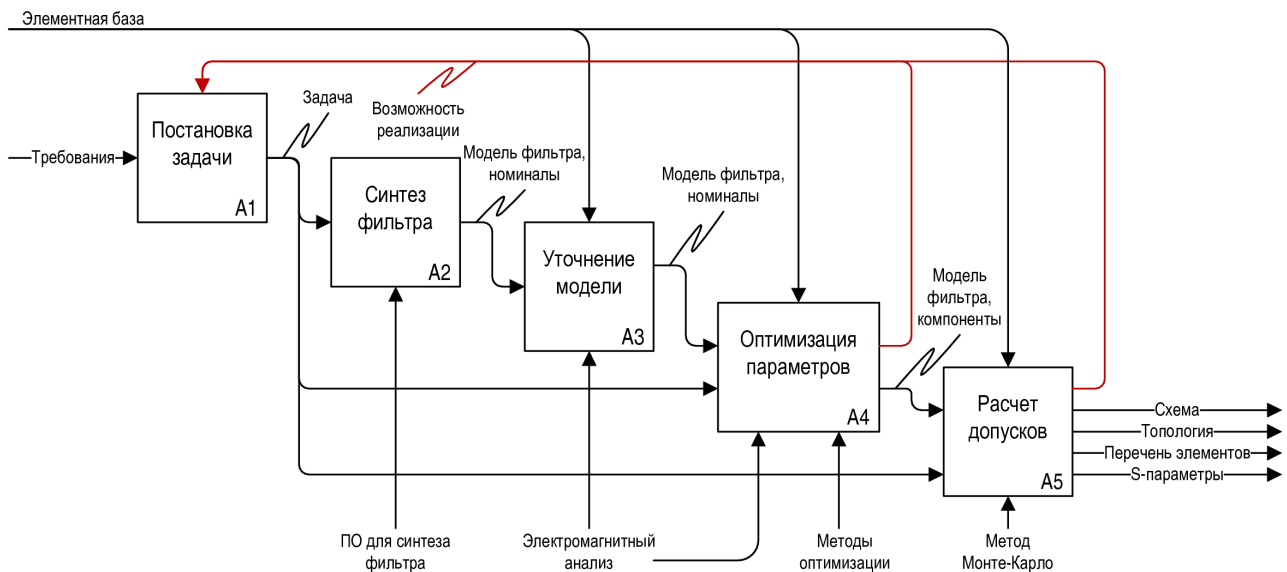
δ_i – dopuszczalna odchyłka i -tego komponentu,

ξ_{ij} – liczba losowa z rozkładu normalnego, $-1 \leq \xi_{ij} \leq 1$, $\delta=0,33$,

W_p i W_s – współczynniki wagowe, które są określone tak samo, jak przy wyznaczaniu minimum funkcji celu (2)

W rezultacie, mamy podstawowy schemat filtra, wykaz elementów z nazwą wytwórcy i tolerancją wartości nominalnych oraz topologią na płycie drukowanej.

Metodyka projektowania filtrów, z wykorzystaniem notacji IDEF0, została przedstawiona na rys. 14.



gdzie: A_1 – sformułowanie zadania

A_2 – synteza filtra

A_3 – dokładniejszy model

A_4 – optymalizacja parametrów

A_5 – obliczanie dopuszczalnych odchyłek

Rys. 14. Metodyka projektowania filtrów analogowych

Głównym oprogramowaniem jest tu dostępna baza elementowa.

Po sformułowaniu zadania należy przeprowadzić syntezę filtra przy pomocy dostępnego oprogramowania. Wtedy, należy doprecyzować modele i przeprowadzić analizę elektromagnetyczną, w wyniku której zostanie uzyskany model topologiczny filtra, doprecyzowane modele komponentów i ich nominalne wartości.

Model o wartościach nominalnych przekazywane są do etapu optymalizacji. Jako rezultat uzyskuje się model topologiczny z S-parametrami, na miejsce modeli komponentów o nominalnych parametrach. Obliczenie dopuszczalnych odchyłek realizowane jest przy pomocy metody Monte Carlo. Każdy komponent na własny numer wyrobu, w którym wskazane są przynajmniej wartości nominalne i ich tolerancja. Na wyjściu etapu optymalizacji numery własne wszystkich komponentów są już znane, ale jeszcze bez tolerancji. W procesie obliczania dopuszczalnych odchyłek, numer własny jest określony w pełni.

Sposób ten ma zastosowanie w projektowaniu filtrów we współczesnych systemach zautomatyzowanego projektowania, takich jak Keysight Genesys, Advanced Design System, itp.

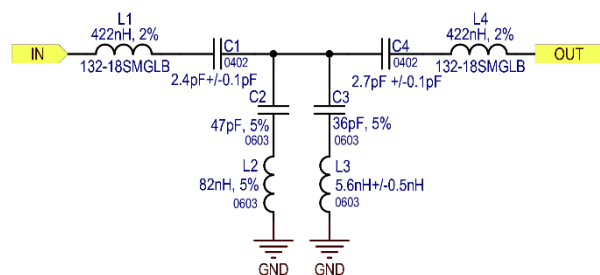
W szóstym rozdziale przedstawione zostały rezultaty praktyczne zastosowania opisanych wcześniej metody i sposobu projektowania filtrów analogowych.

Filtr pasmowoprzepustowy 114÷126 MHz

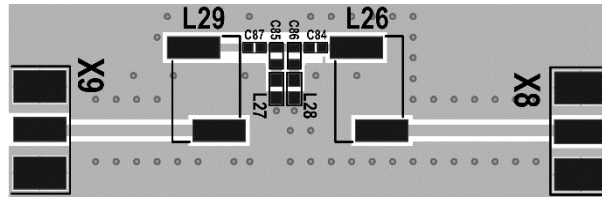
Ten zakres częstotliwości jest wykorzystywany w lotnictwie. Dla przekazania sygnału katastrofy zarezerwowana jest częstotliwość 121,5 MHz. Filtr wstępny na dany zakres częstotliwości jest wykorzystywany w zestawie odbiornika radiowego sygnałów awaryjnych. Jest taki wymóg, aby zapewnić tłumienie zwierciadlanego kanału nie mniej niż 50dB i najlepiej wytłumić sygnały stacji nadawczych w paśmie 66÷108 MHz oraz wytłumić częstotliwości w okolicy 85 MHz, nie mniej niż z 40÷50 dB, z wyjątkiem sygnałów przychodzących do niskoszumnego wzmacniacza odbiornika radiowego sygnału zewnętrznego, o częstotliwości równej pierwszej częstotliwości pośredniej.

Filtr był projektowany zgodnie z omawianym w poprzednim rozdziale sposobie w wykorzystaniem programu Keyright Genesys 2018. W autoreferacie zostały zaprezentowane wyniki badania rozpatrywanego filtra na stanowisku doświadczalnym, a nie w zestawie gotowego urządzenia. Doświadczalna płytka miała 4 warstwy przewodzące, wykonana z materiału FR-4.

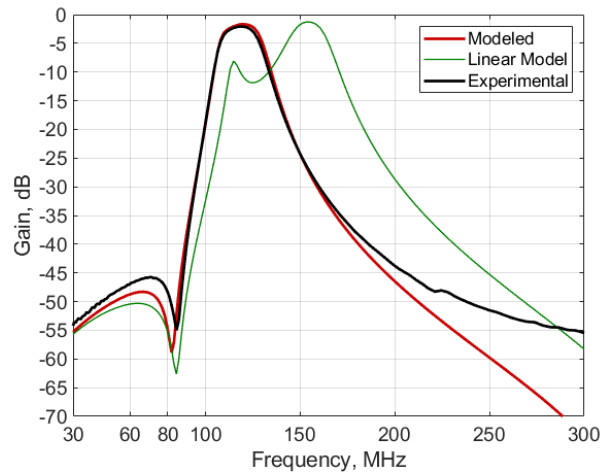
Schemat filtra o wartościach nominalnych parametrów komponentów i topologia przedstawione są na rys. 15 i 16 odpowiednio. Porównanie charakterystyk teoretycznych i eksperymentalnych przedstawione jest na rys. 17, a fotografię stanowiska pomiarowego na rys. 18.



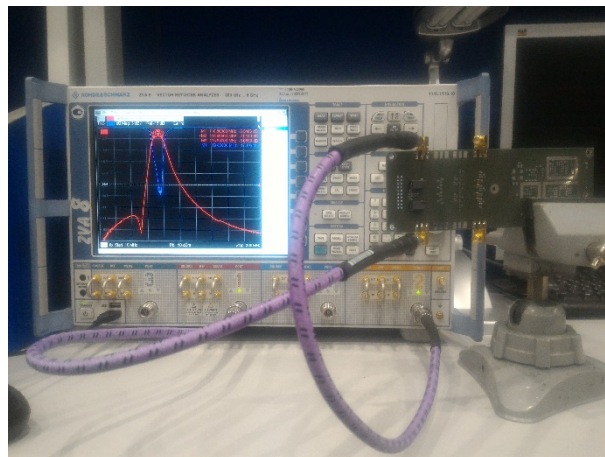
Rys. 15. Schemat filtra o paśmie przepustowym 114÷126 MHz



Rys. 16. Topologia filtra o paśmie przepustowym 114÷126 MHz



Rys. 17. Eksperymentalna i teoretyczna charakterystyki filtra o paśmie przepuszczania 114÷126MHz



Rys. 18. Fotografia filtra z jego charakterystyką częstotliwościową

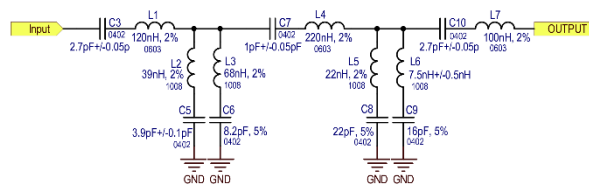
Charakterystyka eksperymentalna była uzyskana przy pomocy wektorowego analizatora Rohde & Schwartz ZVA8. Dołączenie filtra do kabli pomiarowych było dokonane przy pomocy złączek SMA. Na rys. 17 pokazane są charakterystyki eksperymentalna i teoretyczne. Jedna charakterystyka teoretyczna „Modeled” została uzyskana przy pomocy zaproponowanej metody, a druga – „Linear Model” w wyniku podstawienia nominalnych wartości parametrów komponentów, uzyskanych w przedstawionej metodzie, do prostego modelu otrzymanego przy pomocy metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej. Można zauważyć dużą zgodność charakterystyki obliczonej wg proponowanej metody z

eksperymentalną, a znaczące różnice w stosunku do charakterystyki uzyskanej przy pomocy prostego modelu. Rozbieżność w obszarze wysokich częstotliwości można wyjaśnić obecnością indukcyjności wzajemnej między cewkami, której nie uwzględnia się w rozpatrywanej metodzie.

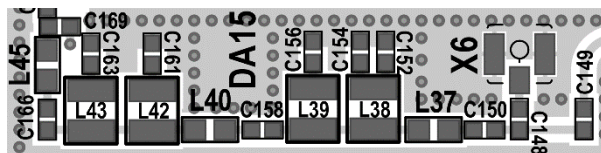
Filtr pasmowoprzepustowy 265÷295 MHz

Filtr ten projektowany był dla wydzielenia częstotliwości pośredniej w zestawie urządzenia do transmisji radiowej. Na wyjściu mieszacza konieczne jest wydzielenie konkretnego pasma częstotliwości, pozostałe składowe winny być wytłumione nie mniej niż o 60 dB.

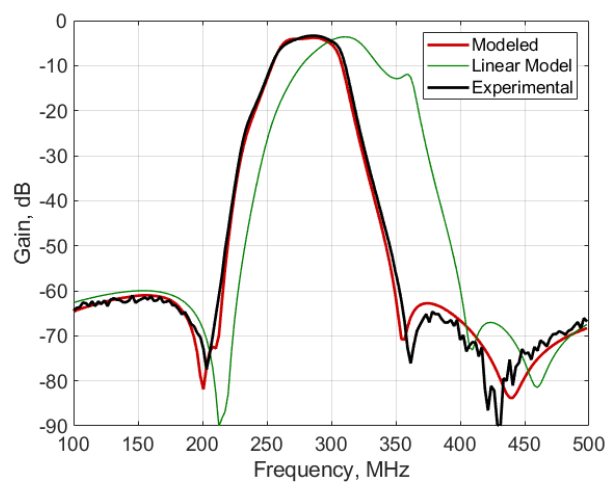
Filtr wykonany był przy wykorzystaniu sześciowarstwowej płytki drukowanej z materiału FR-4, jako część gotowego urządzenia. Połączenia z kablami pomiarowymi były wykonane przy pomocy dwóch miniaturowych złączek U.FL-R-SMT-1 i kabla adaptera U.FL-SMA dla dołączenia do złączek SMA kabli pomiarowych. Ich charakterystyki były uwzględnione w charakterystyce częstotliwościowej filtra.



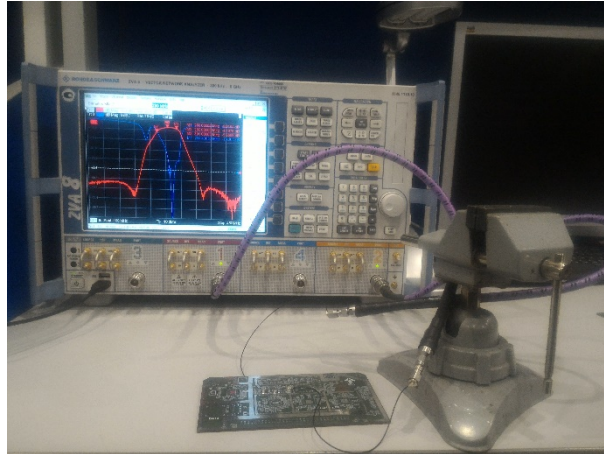
Rys. 19. Schemat filtra o paśmie przepuszczania 265÷295 MHz



Rys. 20. Topologia filtra o paśmie przepuszczania 265÷295 MHz



Rys. 21. Eksperymentalna i teoretyczne charakterystyki częstotliwościowe rozpatrywanego filtra



Rys. 22. Fotografia filtra i jego eksperymentalna charakterystyka częstotliwościowa

Topologia filtra jest przedstawiona rys. 20. Wejście filtra (wejście mieszacza) znajduje się z prawej strony i tam znajduje się złączka V.FL-R-SMT-1 z oznaczeniem pozycji X6. Złączka wyjściowa umieszczona jest po drugiej stronie płytki drukowanej, dlatego jest niewidoczna. Na schemacie zamieszczonym na rys. 19 nie są przedstawione kondensatory blokujące o pojemności 10 nF, które nie mają znaczącego wpływu na charakterystykę częstotliwościową. Zależności teoretyczne zostały uzyskane w sposób analogiczny jak przy poprzednim filtrze.

W zakończeniu rozprawy sformułowane są wnioski końcowe.

Główne wyniki

W procesie rozwiązywania zadań sformułowanych w rozprawie, uzyskane zostały następujące wyniki:

1. Przeprowadzony został przegląd i analiza różnych rodzajów nowoczesnych filtrów LC w aparaturze radioelektronicznej w zakresie WCz. Przeanalizowane zostały podstawowe metody ich projektowania.
2. Wykazano znaczną rozbieżność wyników eksperymentalnych i obliczeniowych charakterystyk częstotliwościowych analogowych filtrów LC w paśmie WCz, uzyskanych przy pomocy szeroko rozpowszechnionej metody aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej. Związane jest to z wpływem pasożytniczych parametrów komponentów i topologii, które wnoszą zauważalne zniekształcenia w charakterystyce częstotliwościowej przy częstotliwości kilkudziesięciu MHz.
3. Opracowana została metoda projektowania filtrów analogowych w zakresie WCz, pozwalająca skrócić czas strojenia prototypu, zwiększyć zgodność eksperymentalnych i obliczeniowych charakterystyk częstotliwościowych oraz wykluczyć stosowanie komponentów dostrajanych. Brak komponentów dostrajanych zmniejsza koszt przedsiębiorstwa przy seryjnej produkcji aparatury, zwiększa odporność na działanie czynników zewnętrznych, takich jak drgania, wibracje, zmiany temperatury.
4. Opracowany został model matematyczny filtra analogowego dla obliczeń wartości nominalnych parametrów komponentów i dopuszczalnych ich odchyłek, który pozwala również uwzględniać wpływ parametrów pasożytniczych.
5. Opracowany został algorytm do obliczeń nominalnych wartości komponentów filtra z dyskretnego zestawu wartości na podstawie metod optymalizacji.

6. Opracowany został algorytm wyznaczania dopuszczalnych odchyłek nominalnych wartości komponentów filtra analogowego z wykorzystaniem symulacyjnej metody Monte Carlo.
7. Opracowano sposób projektowania filtrów analogowych z wykorzystaniem modelowania cyfrowego, a przedstawiona została graficznie w notacji IDEFO. Pozwala on na projektowanie filtrów, które nie wymagają strojenia, przy wykorzystaniu produkowanej przemysłowo bazy elementowej.
8. Rezultaty pracy doktorskiej zostały wdrożone w procesie przemysłowym firmy „MKB Kompas” S.A. oraz w procesie dydaktycznym w Rosyjskim Technologicznym Uniwersytecie – MIREA.
9. Opublikowano 8 prac związanych w tematyką rozprawy, w tym 2 wchodzące do bazy Scopus.

Wykaz opublikowanych publikacji