

**Giennadij CZAWKA, Norbert LITWIŃCZUK, Maciej SADOWSKI**  
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

## Binarne sterowanie układem automatycznego dopasowania dowolnych obciążeń zespolonych

**Prof. Giennadij CZAWKA**

Giennadij Czawka uzyskał stopień inż., doktora nauk technicznych oraz doktora habilitowanego w Sankt - Petersburgskim Państwowym Uniwersytecie Elektrotechnicznym „LETI” (Rosja) odpowiednio w 1965, 1969 i 1987r. Od 1988r. - profesor w/w Uniwersytetu oraz od 1993r. - profesor w Politechnice Białostockiej. Jest członkiem IEEE, USA. Główne zainteresowania naukowe: komputerowe projektowanie aparatury elektronicznej, radiokomunikacja, anteny, radiowe kompleksy szerokopasmowe.

e-mail: [ggc@pb.edu.pl](mailto:ggc@pb.edu.pl)



**Dr inż. Norbert LITWIŃCZUK**

Norbert Litwińczuk uzyskał stopień mgr inż. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w 2000r., zaś stopień doktora nauk technicznych w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w 2006r. Od 2000r. pracuje jako asystent w Katedrze Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej WE PB. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół anten i układów antenowych oraz wspomaganego komputerowo projektowania układów radioelektronicznych oraz struktur mikropaskowych.

e-mail: [norlit@we.pb.edu.pl](mailto:norlit@we.pb.edu.pl)



**Dr inż. Maciej SADOWSKI**

Maciej Sadowski uzyskał stopień mgr inż. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w 1996r., zaś stopień doktora nauk technicznych na Politechnice Wrocławskiej w 2004r. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej WE PB. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół systemów radiokomunikacyjnych, projektowania anten i układów antenowych oraz systemów formowania wiązki, a także układów dopasowania w systemach radiokomunikacyjnych.

e-mail: [masadow@pb.edu.pl](mailto:masadow@pb.edu.pl)



**Keywords:** synthesis of matching network, binary control.

### 1. Wstęp

Jednym z aktualnych problemów w radio- i telekomunikacji jest współpraca urządzeń z dołączonymi do nich obciążeniami, które charakteryzują się dynamiczną zmianą parametrów, w tym impedancji (np. anteny). Dopasowanie tego typu obciążeń w danym roboczym paśmie częstotliwości może sprawić wiele trudności.

Istnieją tzw. teoretyczne ograniczenia Fano-Youla na szerokopasmowe dopasowanie dowolnych obciążeń zespolonych za pomocą układów nieprzestrzajanych [1, 3]. To znaczy, że dopasowanie idealne można wykonać tylko na jednej lub kilku częstotliwościach. Istnieje pewna graniczna wartość dopasowania, związana z dobrocią obciążenia zespolonego i szerokością pasma częstotliwości. W zasadzie im większe wartości dobroci i szerokości pasma częstotliwości, tym gorsze dopasowanie. Dla rozpatrywanych obiektów z dynamiczną zmianą impedancji wyniki dopasowania szerokopasmowego będą w znacznym stopniu niezadowolające.

Powstaje zatem zagadnienie opracowania automatycznych przestrzajanych układów dopasowujących. Znane są tylko nieliczne publikacje wydane przez renomowane firmy prezentujące tego typu urządzenia [2]. Jednak nie przedstawiono w nich ani dokładnej struktury takich układów, ani metody ich projektowania.

W niniejszej pracy zaprezentowano metodykę dopasowania w danym paśmie częstotliwości obciążeń o dynamicznie zmieniającej się impedancji [4-6]. Opracowano algorytm projektowania sterowanych binarnie automatycznych układów dopasowujących dla dowolnych obciążeń zespolonych. Omówiono strukturę układu idealnego oraz kwantowanie i kodowanie zmiennych wartości elementów układu. Opracowano modele elementów i całego układu dopasowującego z uwzględnieniem strat, parametrów pasożytniczych, w tym kluczy elektronicznych. Opracowano oprogramowanie komputerowe do syntezy i optymalizacji automatycznych przestrzajanych układów dopasowujących. Zamieszczono przykładowe wyniki projektowania układu i symulacji komputerowych charakterystyk dopasowania w danym paśmie częstotliwości.

### 2. Automatyczne sterowane układy dopasowujące

Struktura automatycznego układu dopasowującego jest przedstawiona na rys. 1 [2].

Podstawowym blokiem takiego układu jest przestrzajany dwugałęziowy obwód dopasowujący  $LC$  z przełączaną strukturą (rys. 2), dzięki czemu można dopasować dowolną impedancję zespoloną  $Z_0$  dołączonego obciążenia w danym paśmie częstotliwości. Do dynamicznego przestrzajania służy blok pomiarowy oraz elektroniczne bloki sterowania całego układu. Tłumik zmniejsza wzbudzenie układu w czasie pomiaru parametrów i przestrzajania obwodu  $LC$ .

#### Streszczenie

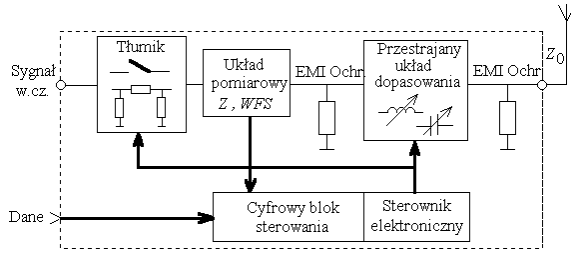
Praca dotyczy problemu binarnego sterowania układu automatycznego dopasowania dowolnych obciążeń zespolonych w szerokim paśmie częstotliwości. Omówiono strukturę układu dopasowania oraz kwantowanie i kodowanie zmiennych wartości elementów układu. Przedstawiono modele elementów, makroelementów oraz całego układu dopasowującego z uwzględnieniem strat i parametrów pasożytniczych. Opracowano oprogramowanie komputerowe realizujące projektowanie, optymalizację oraz symulację układu automatycznego dopasowania z wykorzystaniem modeli rzeczywistych wszystkich elementów układu. Zamieszczono wyniki projektowania i symulacji charakterystyk układu dopasowania anteny o małych rozmiarach geometrycznych stosowanych w terminalach mobilnych systemów radiokomunikacji.

**Słowa kluczowe:** synteza układów dopasowujących, binarne sterowanie.

### Binary control of automatic matching device for arbitrary complex loads

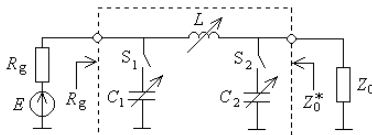
#### Abstract

The paper presents a problem of computer-aided design of automatic matching devices controlled within the broad frequency band for arbitrary complex loads. The basic block of the automatic matching device is a matching circuit consisting of a serial inductance  $L$  and a parallel capacitor  $C$  connected to the device input or output ( $\Gamma$  network). It is described in Paragraph 2. The capacity and inductance values are controlled by a microcontroller. A binary control algorithm for automatic matching of arbitrary complex loads is presented in Paragraph 3. There are described the ideal network structure as well as quantization and coding of the variable network element values. A structure of the binary-stepped switching matching network is shown in Fig.4. A pin diode is used as a switch for the capacitor connected to the device input or output. The models of the matching device real elements with parasitic parameters are used for calculation. A special software for calculations of the automatic matching device elements was developed. In Paragraph 4 there is considered an example of the matching problem of complex load. Calculations were performed for ideal and real structures of the matching device elements. A step of the element quantization value was assumed to be equal to  $\Delta L=0,01\mu\text{H}$  and  $\Delta C=2\text{pF}$ , the values were coded with 8 bits. The calculation results are presented in Figs.6-12. The proposed solution is especially recommended for matching the structures with dynamic changes of complex loads within the broad frequency band.



Rys. 1. Struktura automatycznego sterowanego układu dopasowującego  
Fig. 1. Structure of automatic control for matching device

Schemat ideowy obwodu dopasowania zawiera dwa zmienne elementy reaktancyjne:  $L$  oraz  $C_1$  lub  $C_2$ , podłączane w zależności od wyniku porównania wartości impedancji obciążenia i generatora (rys. 2). Każdy ze schematów ( $C_1L$  lub  $LC_2$ ) ma dopuszczalne i niedopuszczalne obszary zmiany wartości impedancji obciążenia. Przy tym obszar dopuszczalny dla jednego obwodu jest niedopuszczalny dla drugiego i odwrotnie. W taki sposób zastosowanie obu schematów pokrywa cały dowolny obszar zmiany impedancji obciążenia  $Z_0$  w zadanym paśmie częstotliwości.



Rys. 2. Podstawowy schemat układu dopasowującego  
Fig. 2. Basic scheme of matching network

W pracy zaproponowano zastosowanie binarnego sterowania zmianą elementów układu, np.  $2^k \Delta L$  (rys. 4). O wypadkowej wartości pojemności i indukcyjności decydują stany kluczy w poszczególnych sekcjach cewek i kondensatorów. Informacje wymagane do automatycznego sterowania układem dopasowującym są uzyskiwane z układu pomiarowego i danych z syntezy częstotliwości. Cyfrowy blok sterowania generuje komendy do odpowiedniego ustawienia kluczy w obwodzie dopasującym.

### 3. Algorytm projektowania automatycznych układów dopasowujących

Celem projektowania jest zbudowanie układu, który dla danej zespolonej impedancji obciążenia i danej impedancji generatora zapewni możliwie najlepsze dopasowanie pomiędzy nimi w danym szerokim paśmie częstotliwości. Struktura algorytmu projektowania automatycznego układu dopasowującego została przedstawiona na rys. 3.

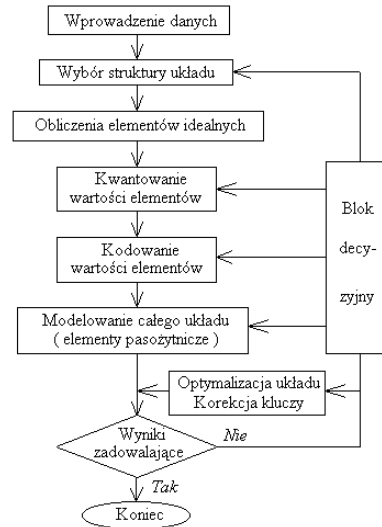
Po wprowadzeniu danych wejściowych dokonywany jest wybór struktury układu sprzęgającego i obliczenie wartości idealnych elementów reaktancyjnych wchodzących w jego skład. Dopasowanie w układzie wystąpi gdy impedancja widziana od strony generatora będzie równa  $R_g$ , zaś ze strony obciążenia - wartości sprzężonej do impedancji obciążenia  $Z_0$  (rys. 2). Po prostych obliczeniach otrzymamy wymagane wartości indukcyjności i pojemności, które pozwolą uzyskać idealne dopasowanie dla dowolnej jednej częstotliwości. Przy zmianie częstotliwości otrzymamy odpowiednie funkcje wartości idealnych elementów układu w danym paśmie roboczym.

Projektowana struktura powinna być uniwersalna dla szerokiego spektrum częstotliwości przy jednoczesnej prostocie układu, więc obliczone idealne wartości indukcyjności i pojemności należy poddać procesowi *kwantowania*. Wtedy dla dynamicznego binarnego sterowania układu każdy zmienny element reaktancyjny jest przedstawiony w postaci połączenia odpowiednich sekcji dołączanych przez klucze: dla  $L$  - szeregowo, dla  $C$  - równoległe (rys. 4).

Następnie wykonuje się *kodowanie* skwantowanych wartości elementów, to znaczy przyporządkowuje się odpowiednie kody

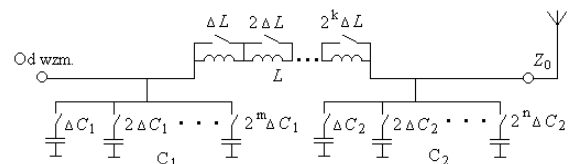
binarne wszystkim zmiennym wartościom poszczególnych elementów układu.

Rozdzielczość kwantowania dobierana jest automatycznie na podstawie maksymalnych zmian parametrów w całym paśmie częstotliwości oraz zadeklarowanych minimalnych wartości przyrostów indukcyjności  $\Delta L$  i pojemności  $\Delta C$ . Skok zmiany wartości indukcyjności i pojemności jest dynamiczny jednak nie mniejszy niż zadeklarowane  $\Delta L$  i  $\Delta C$ . Po kodowaniu wartości elementów otrzymamy całą strukturę układu zakodowaną w postaci ciągu kodów binarnych, odpowiadających stanom kluczy w poszczególnych sekcjach układu.



Rys. 3. Struktura algorytmu syntezy automatycznego układu dopasowującego  
Fig. 3. Synthesis algorithm for automatic matching network

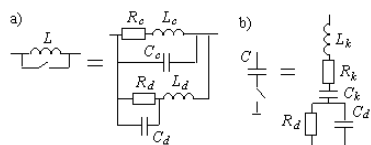
Podczas kwantowania i kodowania dokonywany jest także dynamiczny dobór wartości przedziałów częstotliwości dla poszczególnych skwantowanych podstawowych elementów układu. Jak wiadomo powstaje tzw. błąd kwantowania; w naszym przypadku oznacza to, że po tej operacji dopasowanie na ogół nie jest już idealne, jak było przedtem.



Rys. 4. Struktura binarnie przestrajanego układu dopasowania  
Fig. 4. Structure of binary returned matching device

Do tej pory wszystkie obliczenia zakładały, że elementy układu dopasowującego, w tym klucze sterujące są idealne. Ponieważ w rozwiązaniach rzeczywistych jest to oczywiście nie do przyjęcia, zatem należy uwzględnić parametry pasytywne poszczególnych elementów. Również klucz idealny należy zastąpić rzeczywistym kluczem elektronicznym. W projektowanym układzie dopasującym jako klucz elektroniczny do załączania poszczególnych elementów w sekcjach wybrano diodę p-i-n. Zapewnia ona dostatecznie wysoki poziom przenoszonych mocy i stosunkowo krótki czas działania.

Wykonywane jest zatem modelowanie całego układu z uwzględnieniem strat, parametrów pasywytycznych i kluczy elektronicznych. Przyjęte modele rzeczywistych elementów układu uwzględniają następujące parametry pasywytyczne: rezystancje i pojemności własne cewek, indukcyjności i rezystancje doprowadzeń kondensatorów oraz straty w kondensatorach, rezystancje, indukcyjności doprowadzeń oraz pojemności diody p-i-n w stanach przewodzenia i blokowania (rys. 5).



Rys. 5. Schematy zastępcze cewki  $L$  (a) i kondensatora  $C$  (b) z kluczami  
Fig. 5. Equivalent schemes of coil  $L$  (a) and capacitor  $C$  (b) with keys

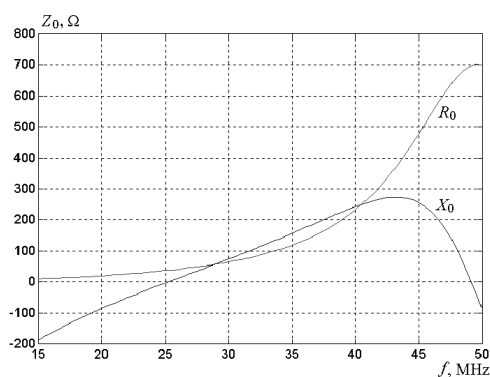
Wykonanie kwantowania wartości elementów podstawowych oraz uwzględnienie parametrów pasożytniczych w znaczny sposób zwiększa rząd całego sprzęgacza. W przypadku idealnym mamy tylko dwa elementy reaktancyjne, zaś dla całego układu rząd obwodu może być obliczony według wzoru:  $N = 4(k + m + n)$ , gdzie  $k$ ,  $m$ ,  $n$ , - ilości bitów w kodach odpowiednio dla  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  (rys. 4). Przy zastosowaniu do sterowania kodów 8-bitowych rząd całego układu wynosi 136 (!).

Uwzględnienie parametrów pasożytniczych wszystkich cewek i kondensatorów oraz wprowadzenie modelu rzeczywistego elementu przełączającego w projektowanym układzie prowadzi do znaczącego pogorszenia dopasowania. Objawia się to zmniejszeniem i na ogół przesunięciem maksymalnej wartości  $WFB$ .

Konieczna jest zatem optymalizacja całego układu poprzez zmianę ustawień kluczy w poszczególnych sekcjach układu. Opracowano oprogramowanie komputerowe realizujące optymalizację gradientową z wykorzystaniem funkcji celu uwzględniającej zmiany wartości  $WFB$  na częstotliwościach rezonansowych [4-6]. Możliwe jest również zastosowanie innych metod, np. algorytmów genetycznych. Często w praktyce taka optymalizacja realizowana jest również w układzie regulacji dynamicznej (zastosowanie automatycznego bloku decyzyjnego, rys. 3).

#### 4. Synteza i symulacja komputerowa charakterystyk układu dopasowującego

W pracy rozpatrzono zagadnienie dopasowania przykładowego zespolonego obciążenia (anteny o małych rozmiarach), którego charakterystyka impedancji przedstawiona jest na rys. 6.

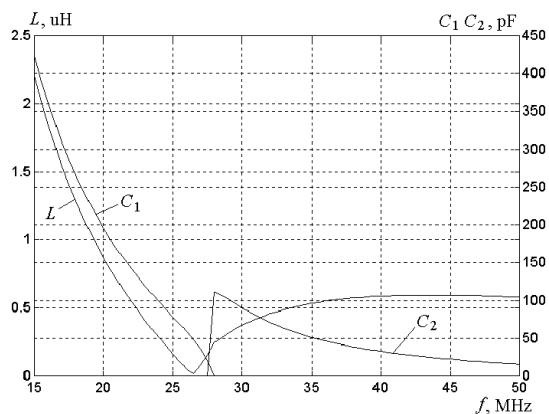


Rys. 6. Impedancja wybranego obciążenia zespolonego  
Fig. 6. Impedance of chosen complex load

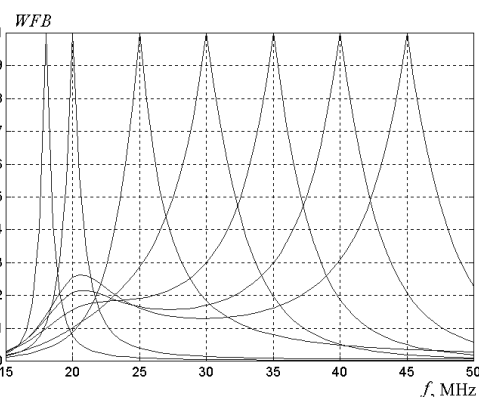
W wyniku obliczeń uzyskano wartości indukcyjności i pojemności idealnych elementów reaktancyjnych układu dopasowującego (rys. 7). Jak widać, przy częstotliwości około 27MHz następuje przełączenie struktury (nieciągłość na wykresie przebiegu pojemności). Kondensator  $C_1$  zostaje odłączony, natomiast zostaje włączony kondensator  $C_2$ . Wartość indukcyjności zmienia się w sposób ciągły.

Obliczenia wykonano dla generatora o rezystancji  $R_g = 50\Omega$ . Przy założeniu idealności elementów reaktancyjnych obwodu możemy otrzymać idealne dopasowanie dla dowolnie wybranej częstotliwości z zadanego pasma pracy (rys. 8).

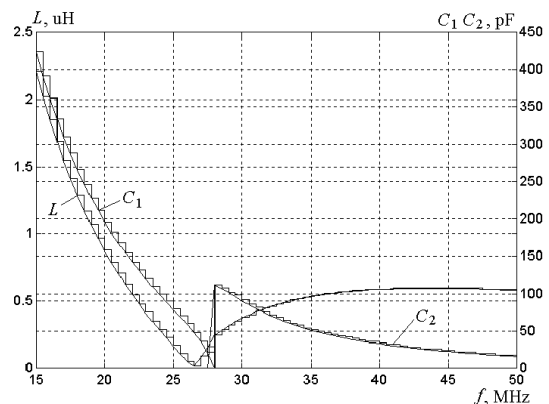
Rezultat kwantowania wartości elementów, przy założeniu  $\Delta L = 0,01\mu\text{H}$  i  $\Delta C = 2\text{pF}$ , przedstawia rys. 9 i tabela 1. Wartości poszczególnych elementów zakodowano za pomocą 8 bitów. Na rys. 10 można zaobserwować wpływ kwantowania wartości elementów na jakość dopasowania.



Rys. 7. Wartości idealnych ciągłych elementów  $LC$   
Fig. 7. Values of ideal continuous  $LC$  elements



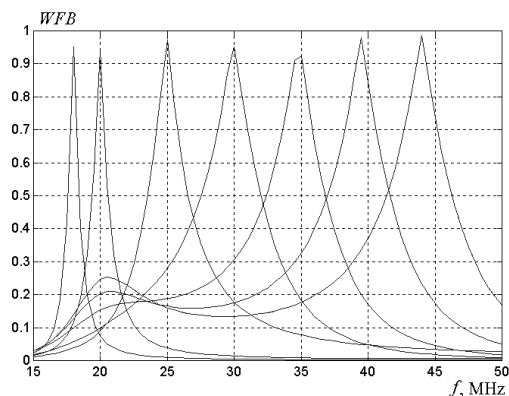
Rys. 8. Dopasowanie dla idealnych ciągłych wartości elementów  $LC$   
Fig. 8. Matching for ideal continuous values of  $LC$  elements



Rys. 9. Wartości elementów  $LC$  idealne kwantowane  
Fig. 9. Values of ideal quantized  $LC$  elements

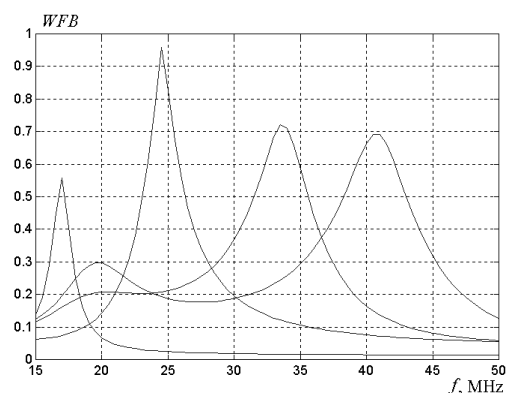
Tab. 1. Skwantowane wartości elementów, ich kody binarne i odpowiadające im wartości  $WFB$  dla kilku wybranych częstotliwości przed optymalizacją  
Tab. 1. Quantized element values, their binary codes and corresponding  $TWR$  values for chosen frequencies before optimization

$f$ , MHz	18	25	35	45
$L$ , $\mu\text{H}$	1,29	0,17	0,54	0,60
$C_1$ , pF	266	80	-	-
$C_2$ , pF	-	-	52	24
$L$	10000001	00010001	00110110	00111100
$C_1$	10000101	00101000	00000000	00000000
$C_2$	00000000	00000000	00011010	00001100
$WFB$	0,951	0,972	0,924	0,985



Rys. 10. Dopasowanie dla wartości LC idealnych kwantowanych  
Fig. 10. Matching for ideal quantized values of LC elements

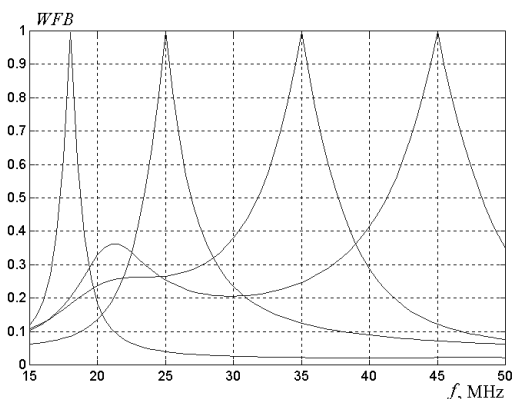
Następnym krokiem było uwzględnienie zadeklarowanych parametrów pasożytniczych i modeli rzeczywistego klucza elektronicznego (diody *p-i-n*). Wyniki zostały zaprezentowane na rys. 11. Jak widać wpływ parametrów pasożytniczych jest znaczący. Można tu zaobserwować, że pogorszenie jakości dopasowania wynika nie tylko z obniżenia maksymalnych wartości *WFB*, ale także ze znacznego przesunięcia tych maksimów w stronę niższych częstotliwości. Otrzymana wartość *WFB* okazała się niezadowalająca.



Rys. 11. Dopasowanie dla częstotliwości 18, 25, 35, 45 MHz dla wartości elementów LC rzeczywistych kwantowanych przed optymalizacją

Fig. 11. Matching for frequency 18, 25, 35, 45 MHz for real quantized LC elements before of optimization

Konieczna była zatem optymalizacja ustawień kluczy układu zapewniająca kompensację wpływu parametrów pasożytniczych. Wyniki optymalizacji zostały pokazane na rys. 12 i w tabeli 2.



Rys. 12. Dopasowanie dla częstotliwości 18, 25, 35, 45 MHz dla wartości elementów LC rzeczywistych kwantowanych po optymalizacji

Fig. 12. Matching for frequency 18, 25, 35, 45 MHz for real quantized LC elements after of optimization

Tab. 2. Skwantowane wartości elementów, ich kody binarne i odpowiadające im wartości *WFB* dla kilku wybranych częstotliwości po optymalizacji

Tab. 2. Quantized element values, their binary codes and corresponding *TWR* values for chosen frequencies after optimization

<i>f</i> , MHz	18	25	35	45
<i>L</i> , μH	1,17	0,13	0,44	0,46
<i>C</i> <sub>1</sub> , pF	178	68	-	-
<i>C</i> <sub>2</sub> , pF	-	-	48	20
<i>L</i>	01110011	00001101	00101100	00101110
<i>C</i> <sub>1</sub>	01011001	00100010	-	-
<i>C</i> <sub>2</sub>	-	-	00011000	00001010
<i>WFB</i>	0,996	0,998	0,995	0,998

Jak widać sama tylko korekta ustawień kluczy wystarczyła do uzyskania praktycznie idealnego dopasowania na wybranych częstotliwościach.

## 5. Wnioski

W pracy rozpatrzono projektowanie automatycznych przestrajanych w szerokim paśmie częstotliwości układów dopasowujących dla danych dowolnych obciążeń zespolonych. Opracowano algorytm projektowania i optymalizacji sterowanego binarnie dwugałęziowego obwodu dopasowującego LC. Szczegółowo omówiono syntezę układu idealnego, kwantowanie i kodowanie wartości elementów oraz modelowanie i optymalizację całego układu z uwzględnieniem strat, parametrów pasożytniczych i rzeczywistych elementów przełączających. Jako elementy przełączające zostały zastosowane i zamodelowane diody *p-i-n*. Opracowano oprogramowanie komputerowe do syntezy i optymalizacji automatycznych układów dopasowujących w zadanym paśmie częstotliwości. Zamieszczono wyniki przykładowych obliczeń. Należy zauważyć, że wprowadzenie elementów pasożytniczych nadal pozwala na uzyskanie bardzo dobrego dopasowania.

Zaproponowane rozwiązanie jest szczególnie polecane przy dopasowywaniu obciążeń o dynamicznie zmieniającej się impedancji zespolonej w zadanym paśmie częstotliwości.

Praca została wykonana w Politechnice Białostockiej w ramach projektu S/WE/1/05, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## 6. Literatura

- [1] Fano R. M.: Theoretical limitation of broadband matching of arbitrary impedances, *Journal of Franklin Inst.*, N1, 2, 1950.
- [2] Antenna Tuning Unit, Materiały firmowe ROHDE & SCHWARZ.
- [3] Aleksejew O., Gołkowiak A., Czawka G. i inni: Projektowanie urządzeń radionadawczych z zastosowaniem komputerów, Moskwa, Radio i swiaź, 1987.
- [4] Czawka G., Litwińczuk N.: Komputerowe projektowanie automatycznych antenowych układów dopasowujących, *Materiały Krajowego Sympozjum Telekomunikacji KST-2003*, Bydgoszcz, 2003.
- [5] Czawka G., Litwińczuk N.: Komputerowe projektowanie automatycznych układów dopasowujących, *SPETO*, p.375-378, May 26-28, 2004.
- [6] Litwińczuk N.: Computer-aided design of automatic antenna matching devices, *VI International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, EMC-2005*, p.166-170, St.-Petersburg, Russia, June 21-24, 2005.

otrzymano / received: 02.11.2009

przyjęto do druku / accepted: 04.01.2010

artykuł recenzowany