

Maciej FAJFER

UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki,
Al. Prof. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Dwuzakresowy analizator widma dla zakresu częstotliwości radiowych

Mgr inż. Maciej FAJFER

Pracuje jako asystent w Zakładzie Metrologii i Podstaw Elektrotechniki na Wydziale Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki. W pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami automatyzacji procesu pomiarowego, programowaniem układów mikroprocesorowych. Zajmuje się szeroko pojętą techniką analizy widma sygnałów elektrycznych.



e-mail: maciej.fajfer@utp.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizator widma, zrealizowany w technice analogowej. Przedstawione tu rozwiązanie dotyczy analizatora w klasycznym układzie z przemianą częstotliwości. Sterowanie części analogowej zrealizowano za pomocą mikrokontrolera 8-bitowego. Zaprezentowano przykład zmiany koncepcji realizacji klasycznego analizatora widma, pozwalający na zmniejszenie kosztów przyrządu i poprawę komfortu obsługi. Wskazania urządzenia są dostatecznie zbliżone z przyrządami wzorcowymi.

Słowa kluczowe: analizator widma, przemiana częstotliwości, AVR, PLL, mikroprocesor.

Dual-band spectrum analyzer for radio frequency range**Abstract**

This paper presents a simple spectrum analyzer based on analog techniques and 8-bit microprocessor (Atmel AVR microcontroller – Atmega16A [6]) used in control section. The method of spectrum analysis is frequency conversion with tunable local oscillators in first and second conversion stages. This is an example where first frequency conversion stages are based on module from television receiver and satellite receiver. The local oscillators are controlled by PLL loop. The device has two inputs called “Input A” and “Input B”. Measurement range of “Input A” is from 45MHz up to 860MHz, but for “Input B” it is from 950MHz up to 2000MHz. Block diagram of the spectrum analyzer is shown on figure 1. The device can measure value of the frequency components using marker but it cannot measure amplitude value. Measurements effects are presented on the graphic LCD display based on T6963 (Toshiba) controller [9]. Communication with PC computer is realized with RS232C interface. Article explains a new, simple and cheap but useful structure of the spectrum analyzer. Combination of the measurement errors is presented in table 1. Tables 2 and 3 explains combination of measurements results of analyzer from this article and ROHDE&SCHWARZ FSL3. Figures 4 and 6 explain spectrum of the analog TV channel (fig. 4) and digital TV channel – DVB-T (fig. 6) measured by analyzer from this article. Figures 3 and 5 explain the same channel like figures 4 and 6, but it was measured by FSL3 spectrum analyzer.

Keywords: spectrum analyzer, frequency conversion, AVR, PLL, microprocessor.

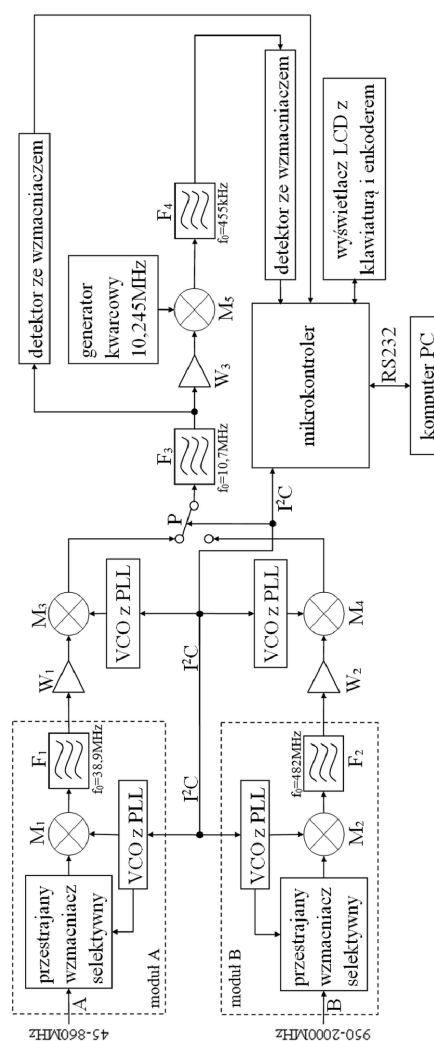
1. Wprowadzenie

Na rynku dostępnych jest wiele różnych analizatorów widma. Wyróżnić tu można przyrządy złożone takie jak analizatory FSH4/FSH8 firmy ROHDE&SCHWARZ, wyposażone w funkcje dodatkowe, jak analizator wektorowy, czy generator śledzący [1]. Przyrządy takie mimo oczywistej użyteczności mają wysoką cenę. Ponadto przeciętny użytkownik nie jest w stanie wykorzystać w pełni cech takiego urządzenia. Dlatego też w wielu przypadkach możliwe jest wykorzystanie przyrządów o mniejszej złożoności. Przykładem może tu być analizator widma Protek-3201 [2]. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania zasadne okazuje się wyko-

nanie analizatora widma w oparciu o koncepcję przedstawioną w artykule.

2. Budowa przyrządu

Uproszczony schemat blokowy urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy analizatora widma
Fig. 1. Simplified block diagram of the spectrum analyzer

Urządzenie jest układem potrójnej, lub podwójnej przemiany częstotliwości w zależności od nastawy multipleksera występującego na wejściu przetwornika A/C mikrokontrolera [3].

Przyrząd posiada dwa wejścia przewidziane do dołączenia sygnału pomiarowego. Wejście A jest przystosowane dla zakresu częstotliwości 45-860 MHz. Natomiast wejście B dla zakresu 950-2000 MHz (rys. 1). Zakresy te wynikają z parametrów modułów, tworzących bloki wstępnych przemian częstotliwości (moduły A i B). W skład modułów A i B wchodzi wzmacniacz wejściowy, który przestrajany jest wspólnie z oscylatorem lokalnym, objętym pętlą PLL. Wykorzystano tu sygnał, pochodzący z wyjścia filtra dolnoprzepustowego pętli PLL [4]. Funkcję pętli PLL realizują układy typu TSA5512. Filtry p.cz. (pośredniej częstotliwości) – odpowiednio F_1 i F_2 wybierają pożądane produkty prze-

miany częstotliwości z widma otrzymanego na wyjściu mieszaczy M_1 i M_2 .

W przypadku zastosowania częstotliwości wzorcowej 4 MHz wartość kroku strojenia układu TSA5512 wynosi 62,5 kHz [5]. Jest to wartość zbyt duża dla proponowanego urządzenia. W związku z tym pętlemi PLL objęto również układy heterodyn drugiej przemiany częstotliwości. Zastosowano układ TSA6057, który pozwala na osiągnięcie kilku wartości kroku. W przypadku zastosowania nietypowej częstotliwości wzorcowej, wynoszącej 5 MHz możliwe jest wybranie wartości kroku 1,25 kHz [6]. Należy zauważyć, że otrzymana wartość nie jest przypadkowa, ponieważ $62,5/1,25=50$. Zatem ma miejsce całkowity podział, co umożliwia poprawę rozdzielczości przestrajania. Ponadto maksymalna częstotliwość wejściowa układu TSA5512 wynosi 1,3 GHz [5]. W związku z tym w module B zastosowano dzielnik częstotliwości (tzw. prescaler) typu MB506, który może pracować z maksymalną częstotliwością 2,4 GHz [7]. Wybrany współczynnik podziału wynosi 64. Pozwala to uzyskać krok przestrajania modułu B, wynoszący $62,5\text{kHz} \cdot 64=4\text{ MHz}$.

Wszystkie układy pętli PLL sterowane są poprzez szynę I²C [5, 6] za pomocą 8-bitowego mikrokontrolera rodziny AVR typu Atmega16A [3].

Układy drugiej przemiany częstotliwości - tzn. wzmacniacze p.c.z. W_1 i W_2 , mieszacze M_1 i M_2 oraz układy heterodyn zrealizowane są za pomocą układu TDA5630, który zawiera trzy, przełączalne układy przemiany częstotliwości [8]. Wykorzystano bloki 1 i 2 układu TDA5630. Wspomniana możliwość przełączania bloków pozwala zrealizować przełącznik P.

Moduły A i B posiadają typowe częstotliwości pośrednie, wynoszące odpowiednio 38,9 MHz i 482 MHz. Do takich też częstotliwości może zostać wykorzystany układ TDA5630. Częstotliwość pośrednia drugiej przemiany częstotliwości wynosi 10,7 MHz – filtr F_3 . Sygnał pochodzący z filtra F_3 dołączony jest do detektora. Natomiast napięcie stałe z detektora, którego wartość jest proporcjonalna do wartości szczytowej dołączono do wejścia 10-bitowego przetwornika A/C mikrokontrolera [3]. Sygnał z filtra F_3 dołączony jest również poprzez wzmacniacz W_3 do wejścia układu mieszacza M_5 . Zastosowany tu układ typu NE612 jest typowym mieszaczem podwójnie zrównoważonym z układem oscylatora lokalnego [9]. Stała częstotliwość heterodyny, wynosząca 10,245 MHz pozwala na uzyskanie produktu na wyjściu mieszacza o częstotliwości 455 kHz. Sygnał z wyjścia filtra F_4 dołączony jest do kolejnego detektora w sposób analogiczny, jak poprzednio. Ponieważ pasmo przenoszenia filtra F_3 wynosi 300 kHz, natomiast w przypadku filtra F_4 jest to 12,5 kHz możliwa jest skokowa regulacja pasma przenoszenia przyrządu poprzez programowe wybieranie odpowiedniego wejścia przetwornika A/C mikrokontrolera.



Rys. 2. Widok panelu przedniego analizatora widma
Fig. 2. Overview of the back-plane of the spectrum analyzer

Wyniki pomiarów prezentowane są na graficzno-tekstowym wyświetlaczu LCD o rozdzielczości 240x128 pikseli. W wyświetlaczu zastosowano kontroler T6963C [10]. Urządzenie jest konfi-

gurowane przez użytkownika za pomocą enkodera i kilku klawiszy, co tworzy interfejs użytkownika.

Komunikacja z komputerem PC jest realizowana za pomocą portu RS-232C. Wykorzystano tu opracowany na potrzeby urządzenia protokół komunikacyjny typu zapytanie-odpowiedź.

Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie panelu przedniego wykonanego analizatora widma. Widoczne jest menu główne przyrządu.

3. Zasada działania przyrządu

Użytkownik definiuje dwie częstotliwości f_1 i f_2 za pomocą interfejsu użytkownika. Przy czym f_1 jest mniejsze od f_2 . Przyrząd przestrasza się automatycznie od f_1 do f_2 . Następnie następuje powrót do f_1 i ponowne przestrajanie w kierunku f_2 . Ponieważ układ oscylatora lokalnego w trzeciej przemianie częstotliwości nie jest przestrajany i w każdym przypadku f_{h2} jest mniejsze od częstotliwości pośrednich, to wzór na częstotliwość do której dostrojone jest urządzenie ma postać:

$$f_{we} = f_{h1} - f_{h2} - 10,7\text{MHz}, \quad (1)$$

gdzie: f_{we} – częstotliwość sygnału wejściowego (wejście A, lub B); f_{h1} – częstotliwość heterodyny w module A, lub B; f_{h2} – częstotliwość heterodyny drugiej przemiany częstotliwości.

Uwzględniając powyższe, na osi poziomej odwzorowane są wartości częstotliwości obliczonych na podstawie (1) i nastaw dzielników pętli PLL. Urządzenie może być przestrajane z krokiem: 1,25 kHz; 12,5 kHz; 62,5 kHz; 250kHz; 4 MHz; 8 MHz. Jeżeli nastawiony krok przestrajania urządzenia jest mniejszy od kroku strojenia modułu A, lub B, to wówczas heterodyna drugiej przemiany częstotliwości przestrajana jest w obrębie kroku strojenia modułu A, lub B. Ponieważ urządzenie strojone jest w kierunku częstotliwości rosnących, to zgodnie z (1) f_{h2} musi maleć, natomiast f_{h1} rosnąć.

Analizator dostraja się do kolejnych częstotliwości wynikających ze wspomnianego przedziału f_1 , f_2 i nastawionego kroku strojenia. Po osiągnięciu danej częstotliwości wykonywany jest pomiar napięcia na wyjściu wybranego detektora pomiarowego przetwornikiem A/C. Tak otrzymany wynik pomiaru po obliczeniach zostaje zobrazowany na wyświetlaczu w postaci pionowej linii. Użytkownik ma możliwość wykonania pomiarów w skali liniowej, lub logarytmicznej dla osi pionowej. Logarytm z wyniku pomiaru wyznaczany jest za pomocą tablicy wartości logarytmu. Powoduje to uproszczenie i przyspieszenie wykonywania obliczeń.

4. Wyniki badań

Błędy pomiarowe analizatora widma określono poprzez dołączenie do wejść A i B niemodulowanych, sinusoidalnych sygnałów wzorcowych z generatora w.c.z. Ponieważ urządzenie nie umożliwia przeprowadzania pomiarów amplitudy ograniczono się jedynie do badań w zakresie osi częstotliwości. Częstotliwości wzorcowe zmierzono częstotłociomierzem cyfrowym.

Błędy pomiarowe określono poprzez porównanie wskazań analizatora widma i częstotłociomierza. Wartość wskazaną przez częstotłociomierz potraktowano jako dokładną. Bezwzględny błąd pomiaru określono jako [11]:

$$\Delta f = f - f_0, \quad (2)$$

gdzie: f – częstotliwość zmierzona analizatorem widma; f_0 – częstotliwość zmierzona miernikiem częstotliwości.

Natomiast błąd względny pomiaru określono jako [11]:

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\% = \frac{f - f_0}{f_0} \cdot 100\%. \quad (3)$$

W tabeli 1 zestawiono wartości oszacowanych błędów pomiarowych przyrządu.

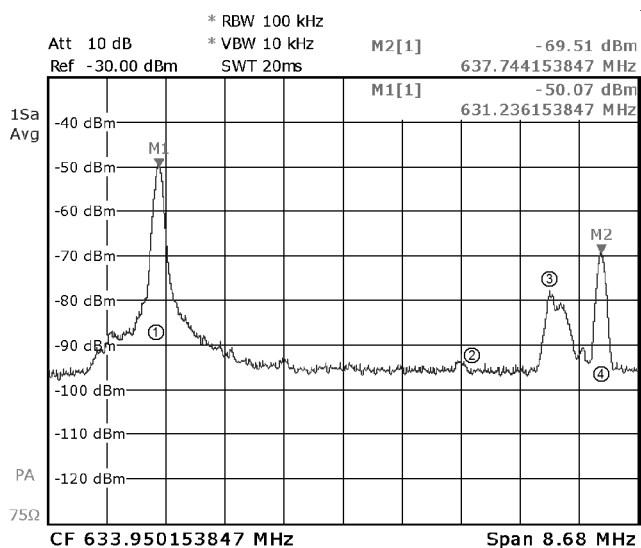
Tab. 1. Zestawienie błędów pomiarowych analizatora widma
Tab. 1. Table of the combination of measurement errors of spectrum analyzer

Wejście A				
Lp.	f , MHz	f_0 , MHz	Δf , MHz	δ_f , %
1	45,13000	45,12324	0,00676	0,01498
2	309,11500	309,11430	0,00070	0,00023
3	573,05625	573,09600	-0,03975	-0,00694
4	837,08375	837,07680	0,00695	0,00083
Wejście B				
Lp.	f , MHz	f_0 , MHz	Δf , MHz	δ_f , %
1	947,35500	947,52770	-0,17270	-0,01823
2	1134,00125	1134,02000	-0,01875	-0,00165
3	1320,63125	1318,99200	1,63925	0,12428
4	1507,38125	1507,53350	-0,15225	-0,01010

Wartości błędów pomiarowych obliczono na podstawie (2) i (3). Pomiar wykonano dla czterech częstotliwości z danego zakresu pomiarowego. Częstotliwości dobrano w sposób umożliwiający uniknięcie zakłóceń od istniejących systemów telekomunikacyjnych. Maksymalna częstotliwość sygnału podawanego na wejście B wynika z ograniczonego zakresu zastosowanego generatora w.c.z. Wartości błędów względnych δ_f pozwalają wykazać, że pomiary wykonane za pomocą wejścia A są dokładniejsze.

W celu uwiarygodnienia wskazań wykonano również pomiary widma sygnałów elektromagnetycznych, dostępnych w miejscu pomiaru. Wykorzystano tu analizator widma FSL3 firmy ROHDE&SCHWARZ, który może pracować w zakresie pomiarowym 9 kHz – 3 GHz [12]. Pomiarów dokonano w tych samych warunkach, tzn. za pośrednictwem identycznej anteny i w zbliżonym czasie.

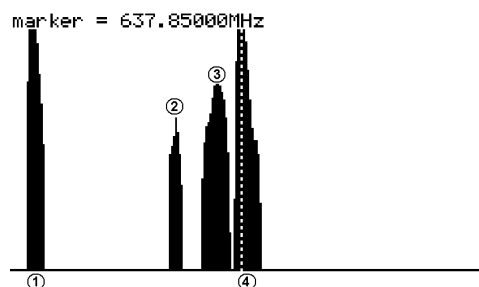
Na rysunku 3 przedstawiono widmo analogowego kanału telewizyjnego (kanał K41), zmierzone analizatorem FSL3.



Rys. 3. Widmo analogowego kanału TV zmierzone analizatorem FSL3
Fig. 3. Spectrum of the analog TV channel measured by FSL3 analyzer

Wartość częstotliwości nośnej wizji wskazywana jest poprzez znacznik M1. Natomiast znacznik M2 wskazuje wartość częstotliwości nośnej fonii.

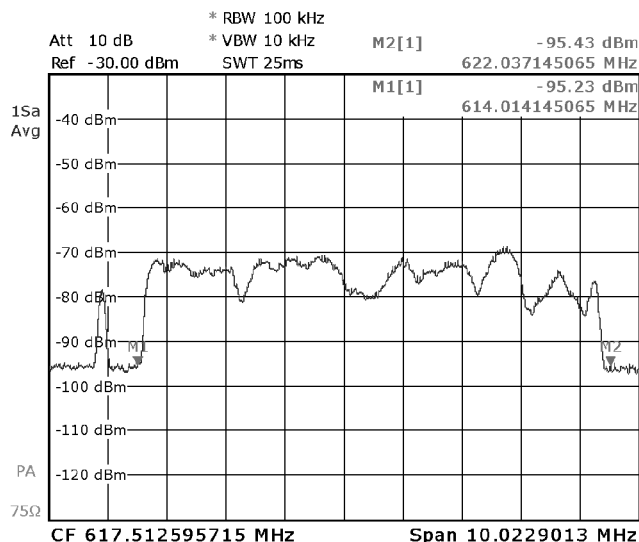
Na rysunku 4 przedstawiono widmo identycznego kanału telewizyjnego, zmierzone analizatorem opisanym w artykule.



Rys. 4. Widmo analogowego kanału TV zmierzone wykonanym analizatorem
Fig. 4. Spectrum of the analog TV channel measured by analyzer built by the author

Wykonany przyrząd posiada tylko jeden znacznik (linia przerywana). Wskazuje on częstotliwość nośnej fonii. Wartość ta jest zbliżona do wskazania znacznika M2 z rysunku 3.

Na rysunku 5 przedstawiono natomiast widmo cyfrowego kanału telewizyjnego DVB-T (kanał K39), zmierzone analizatorem FSL3. W tym przypadku znaczniki M1 i M2 wskazują graniczne częstotliwości kanału telewizyjnego.



Rys. 5. Widmo cyfrowego kanału TV zmierzone analizatorem FSL3
Fig. 5. Spectrum of the digital TV channel measured by FSL3 analyzer

Na rysunku 6 przedstawiono widmo identycznego kanału telewizyjnego, zmierzone analizatorem opisanym w artykule.



Rys. 6. Widmo cyfrowego kanału TV zmierzone wykonanym analizatorem
Fig. 6. Spectrum of the digital TV channel measured by analyzer built by the author

Znacznik wskazuje w tym przypadku częstotliwość środkową. Wartość średniej arytmetycznej wskazań znaczników M1 i M2 z rysunku 5 odpowiada częstotliwości środkowej kanału, zmierzonej analizatorem FSL3. Zatem częstotliwość środkowa wynosi w przybliżeniu 618,02565 MHz. Wynik ten jest zbliżony do wskazania znacznika z rysunku 6.

Charakterystyki widmowe przedstawione na rysunkach 4 i 6 wykonano w skali logarytmicznej. Zastosowany krok strojenia analizatora wynosił 62,5 kHz natomiast pasmo pomiarowe 300 kHz. Obrazy te uzyskano dzięki możliwości współpracy urządzenia z komputerem PC.

Analiza porównawcza rysunków 3 i 4 została sporządzona w formie tabeli (tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiarów analizatora FSL3 i rozwiązania autorskiego dla analogowego kanału TV

Tab. 2. Table of the combination of measurement results of spectrum analyzer built by the author and FSL3 analyzer for analog TV channel

Nr składowej częstotliwościowej	Częstotliwości składowych widma [MHz]		Δf_s [MHz]	δ_f [%]
	autorski analizator	FSL3		
1	631,35000	631,23615	0,11385	0,01804
2	635,72500	635,58748	0,13752	0,02164
3	636,97500	636,87748	0,09752	0,01531
4	637,85000	637,74415	0,10585	0,01660

Numer składowej częstotliwościowej odpowiada pozycji zaznaczonej na rysunkach 3 i 4. Wartości błędów pomiarowych obliczono na podstawie (2) i (3), przyjmując jako wartość wzorcową f_0 wskazanie analizatora FSL3. Względny błąd pomiaru nie przekracza w tym przypadku 0,02164%.

W przypadku analizy porównawczej rysunków 5 i 6 wprowadzono dodatkowe parametry. Szerokość pasma kanału f_b określona jako:

$$f_b = f_g - f_d, \quad (4)$$

gdzie: f_g – częstotliwość górna kanału zmierzona analizatorem widma (analizator FSL3, lub rozwiązanie autorskie); f_d – częstotliwość dolna kanału zmierzona analizatorem widma (analizator FSL3, lub rozwiązanie autorskie).

Ponadto wykorzystano tu również częstotliwość środkową kanału f_s określoną jako:

$$f_s = \frac{f_g - f_d}{2}. \quad (5)$$

Zatem wzór (5) należy interpretować jako wspomnianą już średnią arytmetyczną częstotliwości granicznych kanału. Natomiast względny błąd szerokości pasma kanału δ_{8MHz} został określony jako [10]:

$$\delta_{8MHz} = \frac{f_b - 8MHz}{8MHz} = \frac{f_g - f_d - 8MHz}{8MHz} \cdot 100\%. \quad (6)$$

W związku z tym wzór (6) należy interpretować jako błąd obliczony względem standardowej szerokości kanału telewizyjnego, która wynosi 8 MHz. Analiza porównawcza rysunków 5 i 6 została sporządzona analogicznie, jak w poprzednim przypadku w formie tabeli (tab. 3). Wartości błędów pomiarowych obliczono na podstawie (2), (3) i (6). Natomiast szerokość pasma i częstotliwość środkową kanału wyznaczono na podstawie (4) i (5). Wartość błędu δ_{8MHz} pozwala porównać dokładność wyników pomiarów uzyskanych z analizatora FSL3 i przyrządu wykonanego przez autora. Dokładniejsze są zatem pomiary wykonane przyrządem FSL3.

Tab. 3. Zestawienie wyników pomiarów analizatora FSL3 i rozwiązania autorskiego dla cyfrowego kanału TV

Tab. 3. Table of the combination of measurement results of spectrum analyzer built by the author and FSL3 analyzer for digital TV channel

	Wskazania analizatorów widma [MHz]		Δf [MHz]	δ_f [%]
	autorski analizator	FSL3		
f_d [MHz]	614,28750	614,01415	0,27335	0,04452
f_g [MHz]	622,22500	622,03714	0,18786	0,03020
f_b [MHz]	7,93750	8,02299	-0,08549	-1,06556
f_s [MHz]	618,22500	618,02565	0,19935	0,03226
δ_{8MHz} [%]	-0,78125	0,28738		

Biorąc pod uwagę wartości modułów błędów względnych δ_f z tabel 1, 2 i 3 okazuje się, że wartości tych błędów osiągają mniejsze wartości w tabeli 1 niż w tabelach 2 i 3. Jak już nadmieniono w przypadku szacowania błędów zestawionych w tabeli 1 wykorzystano sygnały niemodulowane. Pozwoliło to uzyskać stabilne w czasie charakterystyki widmowe, przez co możliwe stało się dokładne ustawienie znacznika. Ponadto w trakcie szacowania błędów podanych w tabeli 1 zastosowano minimalny krok przestrzajania, wynoszący 1,25 kHz i pasmo pomiarowe 4,5 kHz.

5. Wnioski

Zasada działania analizatora przedstawionego w artykule i przyrządu FSL3 jest identyczna. Różnice między charakterystykami widmowymi uzyskanymi analizatorem FSL3 i rozwiązaniem autorskim wynikają z mniejszej szybkości przestrajania analizatora przedstawionego w artykule oraz różnej szerokości pasm torów pomiarowych obu przyrządów. Wpływ ma tu również inna w obu przyrządach wartość kroku strojenia. Analizator FSL3 cechuje się też lepszą czułością i większą dynamiką toru pomiarowego. Analizowane sygnały nie są sygnałami deterministycznymi. W związku z tym widoczne różnice wynikają także z niejednoczesnego wykonania pomiarów przez porównywane przyrządy.

Przedstawione rozwiązanie jest przykładem zastosowania typowych elementów analogowych do budowy analizatora widma. Okazuje się, że wykonane urządzenie pozwala przeprowadzić najprostsze pomiary, polegające na wyznaczeniu częstotliwości składowych widma amplitudowego sygnału (rys. 4 i 6). Ponadto możliwe jest wyznaczenie podstawowych parametrów kanału telekomunikacyjnego, takich jak szerokość pasma i częstotliwość środkowa kanału.

Otrzymane wyniki pomiarów są dostatecznie zbliżone z pomiarami wykonanymi analizatorem FSL3 i wskazaniami miernika częstotliwości (tab. 1, 2 i 3).

6. Literatura

- [1] R&S® FSH4/R&S® FSH8 Spectrum Analyzer - Product Brochure.
- [2] Protek-3201 Hand-Held 2GHz RF Signal Strength Analyzer.
- [3] Atmega16A – nota katalogowa, www.atmel.com
- [4] Horowitz P., Hill W.: Sztuka elektroniki cz. 2. WKŁ, Warszawa, 2001.
- [5] TSA5512 – nota katalogowa, www.datasheetcatalog.com
- [6] TSA6057 – nota katalogowa, www.datasheetcatalog.com
- [7] MB506 – nota katalogowa, www.alldatasheet.com
- [8] TDA5630 – nota katalogowa, www.datasheetcatalog.com
- [9] NE612 – nota katalogowa, www.datasheetcatalog.com
- [10] T6963C – nota katalogowa, www.lcd-module.de
- [11] Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa, 2003.
- [12] R&S® FSL Spectrum Analyzer - Product Brochure.