

dr inż. TOMASZ JACKIEWICZ  
Carbonex Sp. z o.o.

dr inż. GRZEGORZ WIŚNIEWSKI  
Politechnika Wrocławska

## Wpływ doboru parametrów filtrów LF na propagację sygnału w szybie kopalnianym

*Kopalniane wyciągi szybowe, zarówno te już eksploatowane, jak i znajdujące się w budowie, z uwagi na swoją specyfikę stanowią znaczne wyzwanie dla konstruktorów urządzeń łączności bezprzewodowej. W Polsce dominującym sposobem realizacji tego typu łączności jest wykorzystanie lin jako nośnika do propagacji fal elektromagnetycznych. W urządzeniach realizujących ten sposób łączności kluczową rolę w zapewnieniu odpowiedniej jakości transmisji odgrywają filtry pasmowe LF, zarówno nadawcze, jak i odbiorcze. W artykule przedstawiono, jak dobór parametrów filtrów wpływa na emisję i propagację fal elektromagnetycznych wykorzystywanych do łączności bezprzewodowej.*

### 1. WSTĘP

---

Zapewnienie dobrej jakości łączności bezprzewodowej w szybach pionowych kopalń podziemnych stanowi duże wyzwanie dla konstruktorów sprzętu elektronicznego, dlatego też historia rozwoju tego typu systemów pokazuje, że nie zawsze zastosowanie metod myślenia „zdroworozsądkowego” stanowi najlepsze podejście dla rozwiązania występujących problemów. Propagacja fal elektromagnetycznych w szybach kopalnianych jest znacznie utrudniona ze względu na:

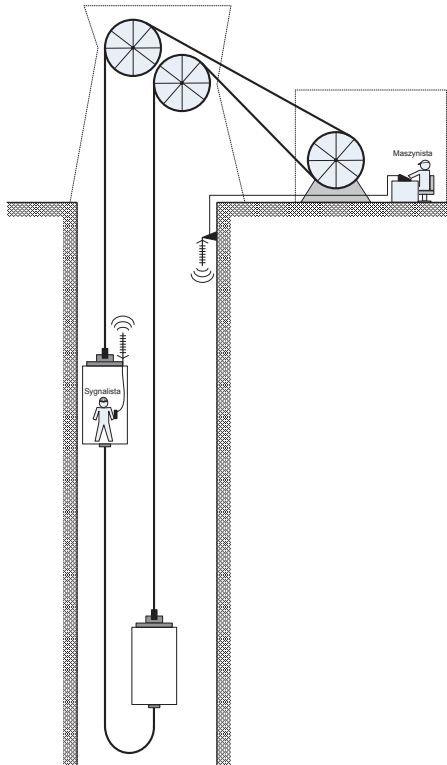
- wymiary geometryczne wyciągu, który przeważnie stanowi walec o średnicy ok. 9 m i długości dochodzącej do 2000 m,
- otoczenie całej przestrzeni wyciągu betonową konstrukcją nośną ze stalowymi wzmocnieniami lub wręcz utworzenie tej konstrukcji wyłącznie z elementów metalowych,
- znaczne nagromadzenie metalowych elementów wyposażenia wyciągu, takich jak przewodniki szybowe, naczynia szybowe czy kable energetyczne i sygnalizacyjne,
- warunki klimatyczne, a w szczególności duża wilgotność, zasolenie i duży gradient temperatury.

Już na samym początku w myśleniu o tym zagadnieniu zarysował się wyraźny podział na trzy rozwią-

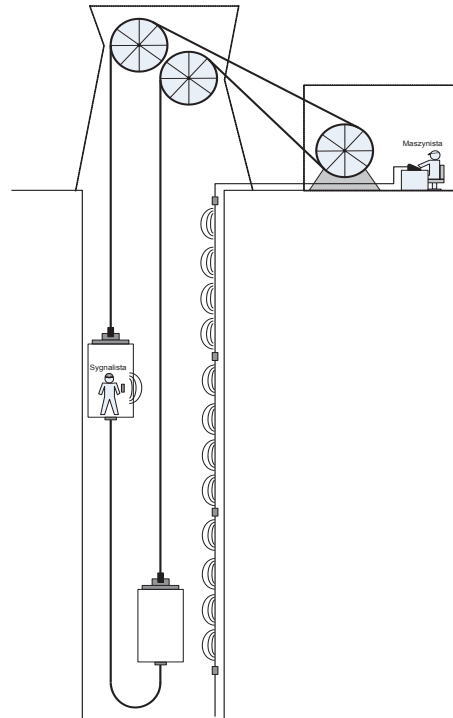
zania techniczne, różniące się sposobem transmisji sygnału, a mianowicie:

- łączność z wykorzystaniem propagowania fal radiowych w zakresie widoczności optycznej anten,
- łączność z wykorzystaniem kabla promieniującego stanowiącego nośnik dwuprzewodowy lub jednoprzewodowy, asymetryczny względem potencjału ziemi,
- łączność z wykorzystaniem lin wyciągowych stanowiących nośnik jednoprzewodowy, a w niektórych przypadkach jednoprzewodowy ziemnopowrotny.

Każdy z tych sposobów propagacji fal elektromagnetycznych narzuca inne wymagania dla konstrukcji systemów łączności, a w konsekwencji wymusza odmienne sposoby ich użytkowania i eksploatacji, co niejednokrotnie decyduje o wyborze konkretnego rozwiązania dedykowanego dla danego obiektu. Łączność w oparciu o wykorzystanie swobodnie propagujących fal elektromagnetycznych realizowana jest przy pomocy anten zlokalizowanych w szybie (rys. 1). W większości przypadków wykorzystywane jest tu pasmo o długości fali 10 m. W doborze pasma duże znaczenie mają rozwiązania prawne obowiązujące w państwie końcowego użytkownika oraz fakt, że tłumienność fal radiowych w szybach kopalnianych wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej znacznie rośnie [1].



Rys. 1. Schemat wykorzystania nadajników radiowych w rozwiązaniu zapewniającym swobodną propagację fal [1]



Rys. 2. Schemat usytuowania kabla promieniującego „cieknącego” wraz z liniowymi wzmacniaczami sygnału [4]

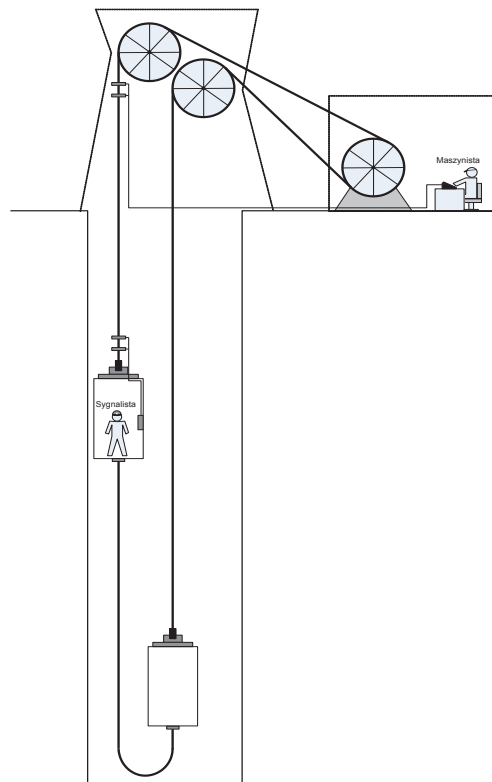
W przypadku łączności z wykorzystaniem kabla promieniującego większość tego rodzaju systemów jako nośnik fali elektromagnetycznej wykorzystuje kabel koncentryczny tzw. „cieknący”, którego ekran jest tak wykonany, że umożliwia sygnałom o częstotliwości radiowej (pasmo o długości fali ok. 2 m) „przeciekanie” do otoczenia, będąc zarazem anteną odbiorczą i nadawczą (rys. 2). W tego typu rozwiązaniu do prawidłowego działania układu wymagane jest zastosowanie co około 350 m liniowego wzmacniacza sygnału [4].

W Polsce bezprzewodową łączność szybową zdominowało trzecie z wymienionych rozwiązań technicznych, czyli łączność z wykorzystaniem lin jako transmitera fali nośnej, pozostawiając urządzeniom z pozostałych rozwiązań funkcję rezerwowego środka komunikacji [2]. W systemach tych, działających w paśmie o długości fali 10 km oraz 2 km, mogą być stosowane rozwiązania następujące:

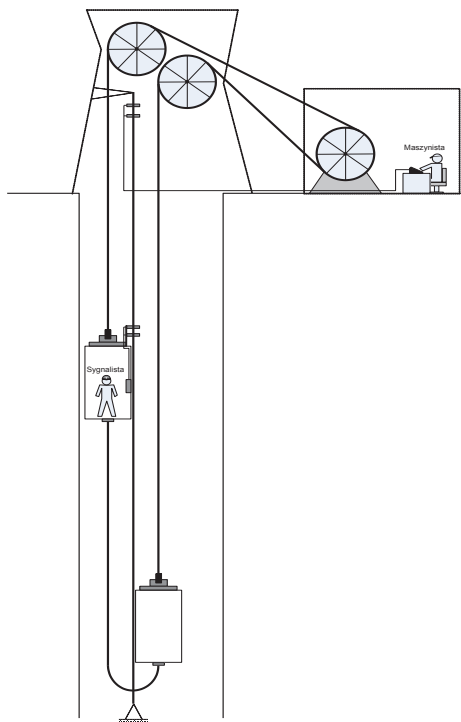
– w przypadku pasma o długości fali 10 km jako nośnik mogą być wykorzystane liny:

- nośna i wyrównawcza,
- tylko liny nośne w układzie wielolinowym,
- liny przewodnicze,
- dodatkowa linka rozciągnięta w szybie,

co – jako przykład zastosowania tego typu rozwiązania – pokazano na rysunkach 3. i 4.,

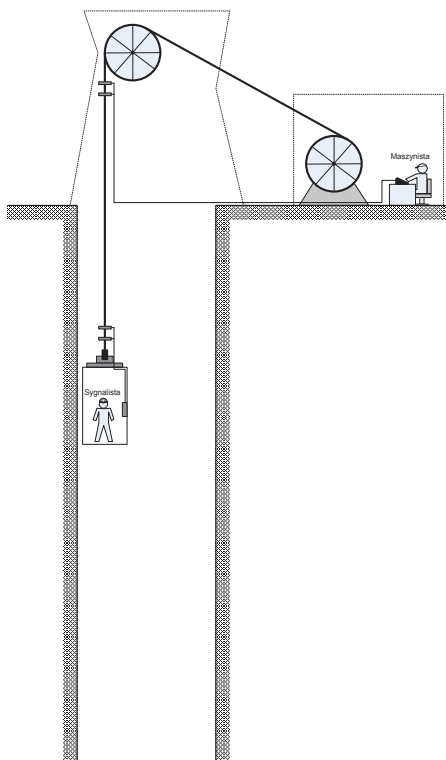


Rys. 3. Schemat realizacji łączności za pomocą lin nośnych [2]



Rys. 4. Schemat realizacji łączności za pomocą lin przewodniczych [2]

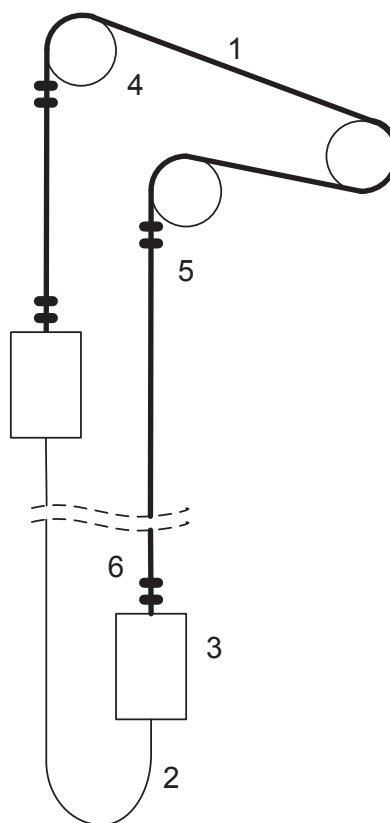
– w przypadku pasma 2 km dla zapewnienia łączności wystarczy sama lina nośna, tworząca z obmurem pojemność sprzęgającą, co – jako przykład – pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat realizacji łączności szybowej za pomocą sprzężenia pojemnościowego [2]

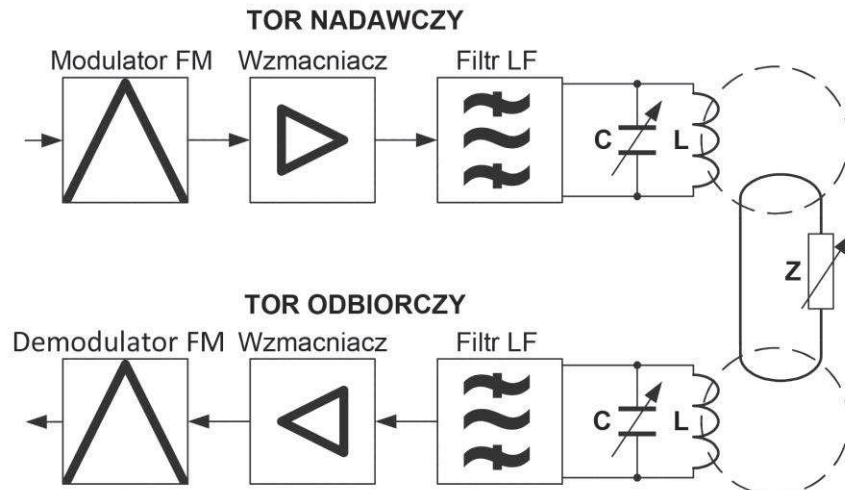
## 2. ZASTOSOWANIE FILTRÓW PASMOWYCH LF

Idea działania urządzeń wykorzystujących liny do propagacji sygnału została przedstawiona na rys. 6. Przykładowy tor sygnałowy tworzą: lina nośna (1), lina wyrównawcza (2), naczynia szybowe (3), a także – w niektórych przypadkach – koła prowadnicze lub napędowe (4). Sygnał wysokiej częstotliwości (w. cz.) jest przesyłany i odbierany z toru za pomocą sprzęgaczy indukcyjnych (5, 6).



Rys. 6. Schemat ideowy linowego toru sygnałowego [43]

Tor nadawczy w urządzeniu tworzą: modulator FM, wzmacniacz w.cz. oraz nadawczy filtr pasmowy LF. Tor odbiorczy składa się z odbiorczego filtra pasmowego LF, wzmacniacza w.cz. oraz demodulatora FM. Zarówno tor nadawczy, jak i odbiorczy jest sprzęgany z torem sygnałowym za pomocą pojemnościowego układu dostrojczego. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy układu nadawczo-odbiorczego [3]

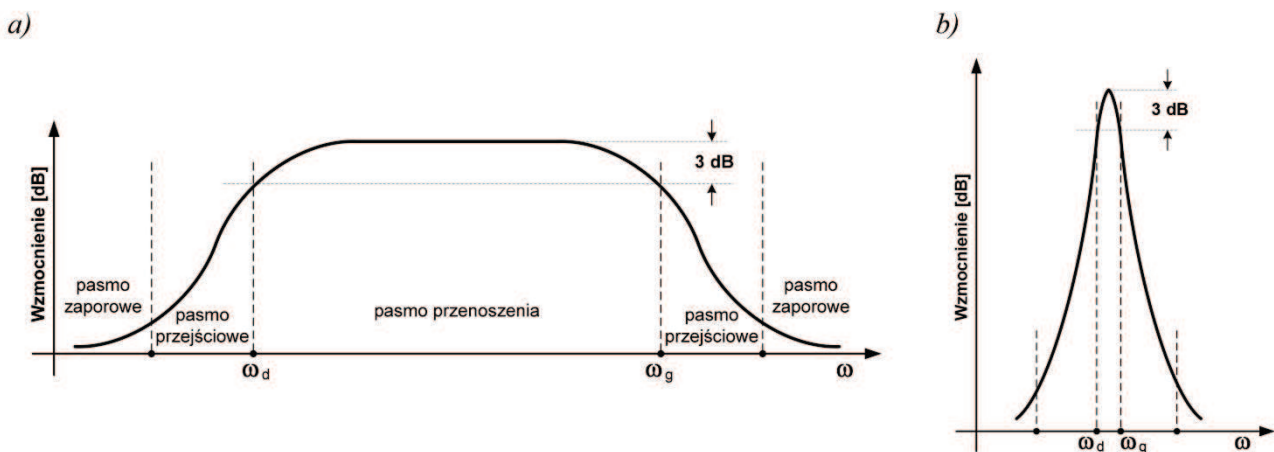
Do kształtowania odpowiedniej charakterystyki pasma w urządzeniach wykorzystuje się filtry środkowoprzepustowe. Odpowiadają one za selektywność odbiornika oraz wydzielają odpowiednią częstotliwość dla nadajnika. W ogólnym przypadku filtr taki może być utworzony poprzez szeregowe połączenie dwóch filtrów – dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego – o częstotliwościach granicznych dobranych tak, aby uzyskać pożądaną częstotliwość środkową i szerokość pasma. Metoda ta jest stosowana w przypadku, kiedy chcemy uzyskać filtr o szerokim paśmie przenoszenia względem częstotliwości środkowej. Jednak z uwagi na fakt, że w szybie konieczne jest czasami zastosowanie kilku urządzeń jednocześnie, a tor sygnałowy wykazuje się dużym tłumieniem, potrzebne są filtry o wąskim paśmie przenoszenia i dużej dobroci filtrów (rozumianej jako stosunek częstotliwości środkowej filtru do jego szerokości pasma), dlatego wykorzystano drugą metodę kon-

struowania filtrów pasmowoprzepustowych, którą jest zastosowanie obwodów rezonansowych LC.

W filtrze pasmowym możemy wyróżnić trzy obszary: zaporowy, przejściowy i przenoszenia, a do opisu właściwości poszczególnych konstrukcji służą następujące parametry [3]:

- częstotliwość środkowa – wartość, dla której tłumienie filtru jest najmniejsze,
- szerokość pasma – różnica pomiędzy maksymalną a minimalną częstotliwością jeszcze przepuszczaną przez filtr, określaną przeważnie dla tłumienia równego 3 dB,
- tłumienie – stosunek sygnału wyjściowego do wejściowego,
- stromość zboczy – wartość określająca, jak szybko filtr zaczyna tłumić sygnał wejściowy.

Przykładowe charakterystyki filtru utworzonego z filtru górnoprzepustowego i dolnoprzepustowego oraz filtru z wykorzystaniem obwodu rezonansowego LC przedstawiono na rys. 8.



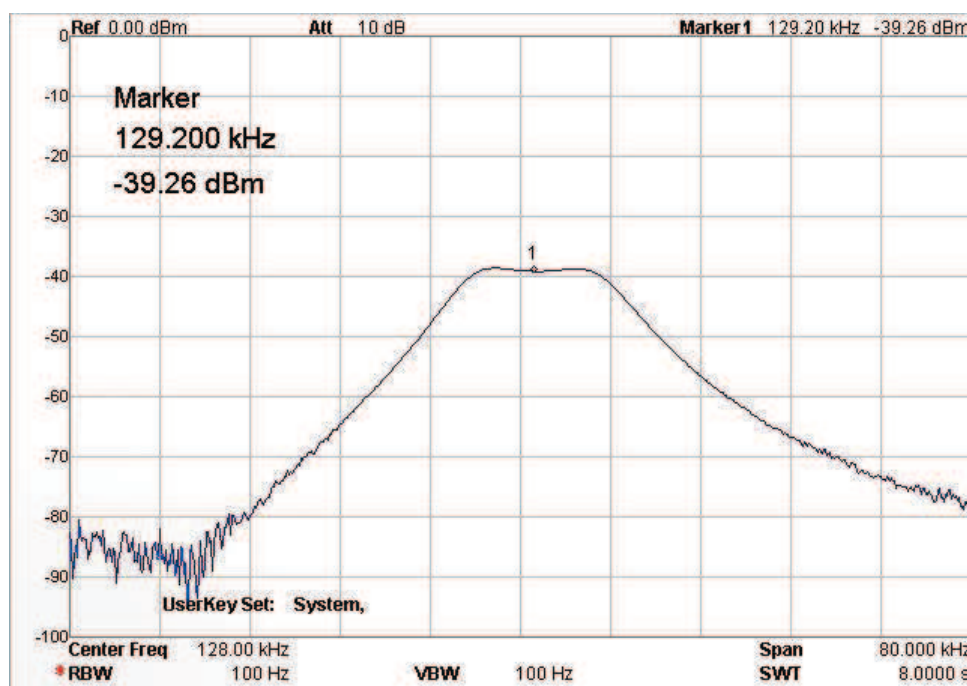
Rys. 8. Charakterystyki filtrów pasmowych: a) utworzonych z szeregowego połączenia filtrów górnoprzepustowego i dolnoprzepustowego, b) utworzonych z obwodu rezonansowego LC [3]

### 3. DOBÓR PARAMETRÓW FILTRÓW LF

W systemach wykorzystujących liny jako nośnik fali występuje odmiana umożliwiająca pracę systemu bez zamkniętej pętli lin, czyli np. bez liny wyrównawczej, co jest częstym przypadkiem w wyciągach awaryjnych, w których zazwyczaj stosuje się napęd bębnowy. W takim układzie sygnał zamyka się przy pomocy liny głównej i sprzężenia pojemnościowego pomiędzy liną i obmurowaniem szybu. Do analizy działania tego typu rozwiązania stosowano specjalnie

projektowane filtry, w których wykorzystywano tzw. sprzężenie nadkrytyczne oraz wzięto najczęściej rozpowszechniony i używany w łączności i sygnalizacji szybowej system, produkowany przez firmę *Carbonex Sp. z o.o.*

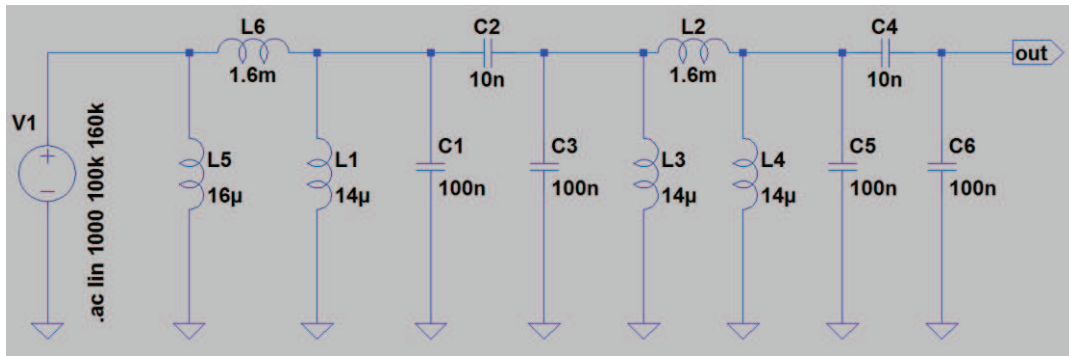
Reprezentantem ilustrującym działanie filtrów ze sprzężeniem „nadkrytycznym” jest system ECHO. Podczas pracy ze sprzężeniem nadkrytycznym pasmo przenoszenia jest szersze. Wynika to z faktu, że jedno maksimum zamienia się na dwa symetryczne rozdzielone charakterystycznym minimum, co przedstawiono na rys. 9. przy użyciu znacznika 1.



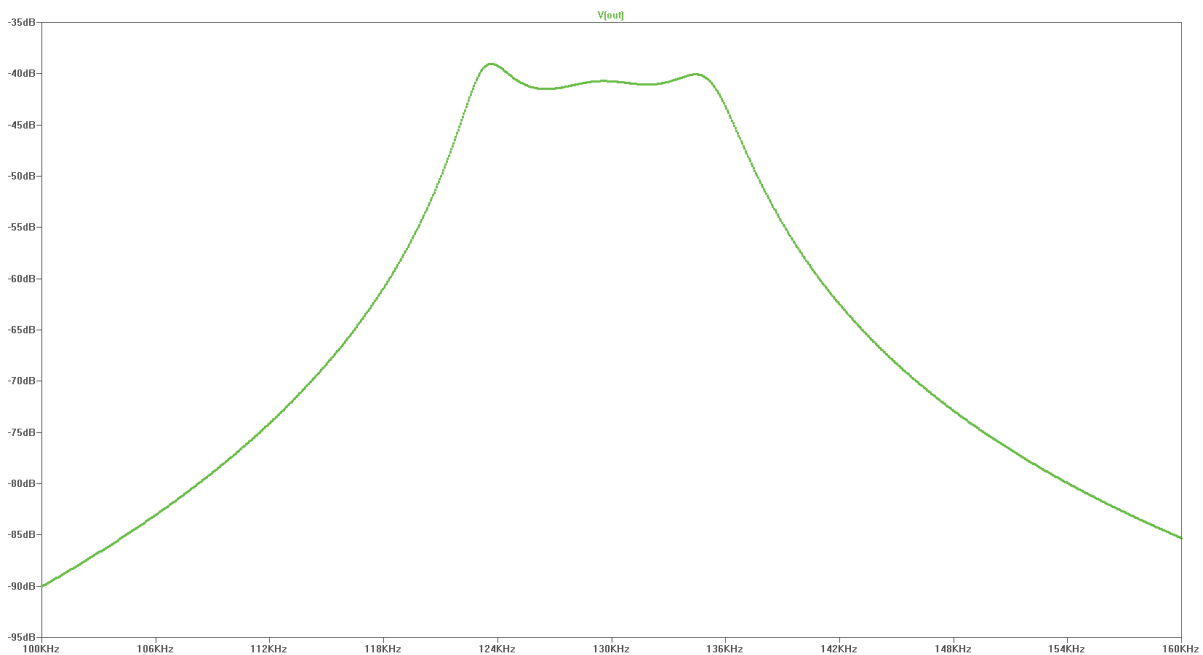
Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtru LF przy sprzężeniu nadkrytycznym;  
1 – charakterystyczne minimum w paśmie przenoszenia

Jeżeli parametry sprzężenia są odpowiednio dobrane, minimum to jest nieznaczne, ale uzyskuje się tym sposobem dość szeroki płaski odcinek ze stromymi zboczami na granicy pasma przepuszczania. Dzięki temu wszystkie częstotliwości wewnątrz pasma przenoszenia są przekazywane z jednakową mocą. W obwodzie nadajnika nie powoduje to powstawania dodatkowej modulacji amplitudowej sygnału nośnego podczas pracy z modulacją częstotliwościową, co zapobiega generowaniu dodatkowych zakłóceń u źródła sygnału. W torze odbiorczym cała szerokość pasma wysokiej częstotliwości jest przenoszona z jednakową mocą. Liniowa charakterystyka w tym zakresie w praktyce skutkuje liniowym wzmocnieniem. Brak sztucznie wzmocnionego lub tłumionego sygnału automatycznie skutkuje brakiem uciążliwych trzasków i szumów w głośniku urządzenia komunikacyjnego. Tego

rozwiązanie (wykorzystujące omówione filtry) nie nadaje się do szybów o głębokości dochodzącej do 2 km, ponieważ długość lin porównywalna jest z długością fali nośnej. Dla takich szybów stosuje się filtry pracujące ze sprzężeniem podkrytycznym. Wynika to z faktu, że przy sprzężeniu podkrytycznym tor nadawczy i tor odbiorczy nie wpływają znacząco na tor sygnałowy, co daje możliwość pracy przy granicznych wartościach pasma. Dobór optymalnych parametrów elementów filtra pracującego w takich warunkach przeprowadzono w oparciu o metody symulacji komputerowej. W celu walidacji modelu filtra najpierw przeprowadzono symulację dla filtra o parametrach dla sprzężenia nadkrytycznego. Na rys. 10. przedstawiono schemat modelu filtra pasmowego toru nadawania, a na rys. 11. – charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową modelu filtra dla sprzężenia nadkrytycznego.



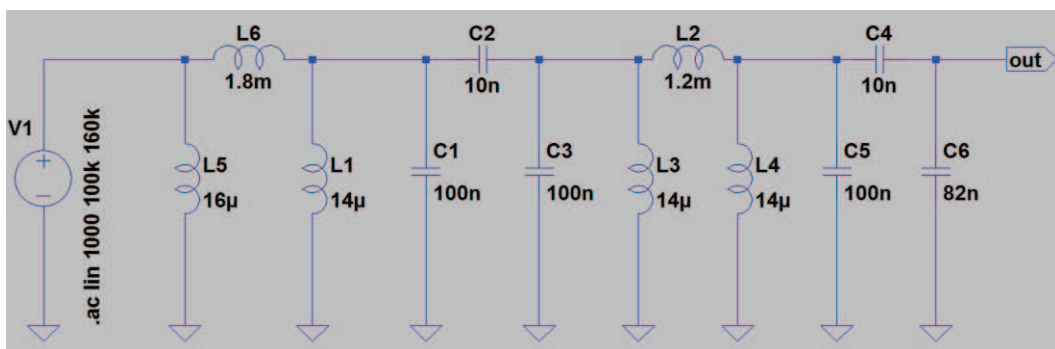
Rys. 10. Schemat modelu filtra pasmowego toru nadawania dla sprzężenia nadkrytycznego



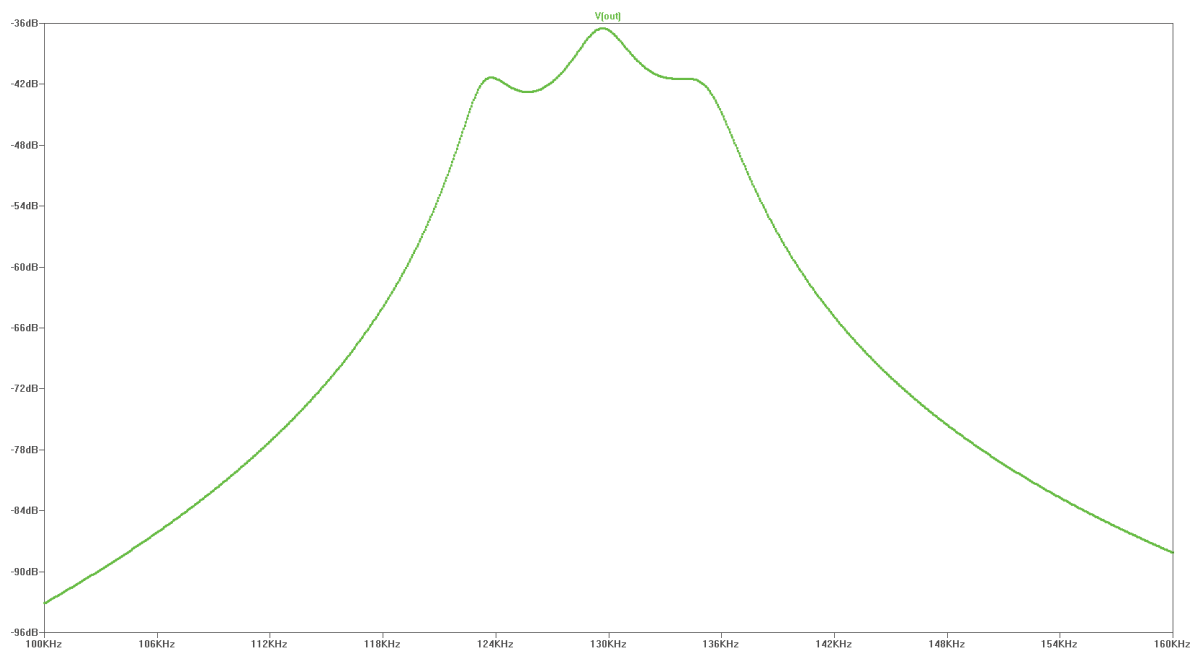
Rys. 11. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa modelu filtra dla sprzężenia nadkrytycznego

Porównując charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową filtra rzeczywistego przedstawioną na rys. 9. z charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową modelu filtra przedstawioną na rys. 11., można było stwierdzić, że model z dużą dokładnością odzwierciedla filtr rzeczywisty. Pozwoliło to na przeprowadzenie drugiego etapu pracy, polegającego

na doborze parametrów modelu filtra optymalnych dla sprzężenia podkrytycznego. Na rys. 12. przedstawiono schemat modelu filtra pasmowego toru nadawania, a na rys. 13. – charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową modelu filtra o parametrach optymalnych dla sprzężenia podkrytycznego.



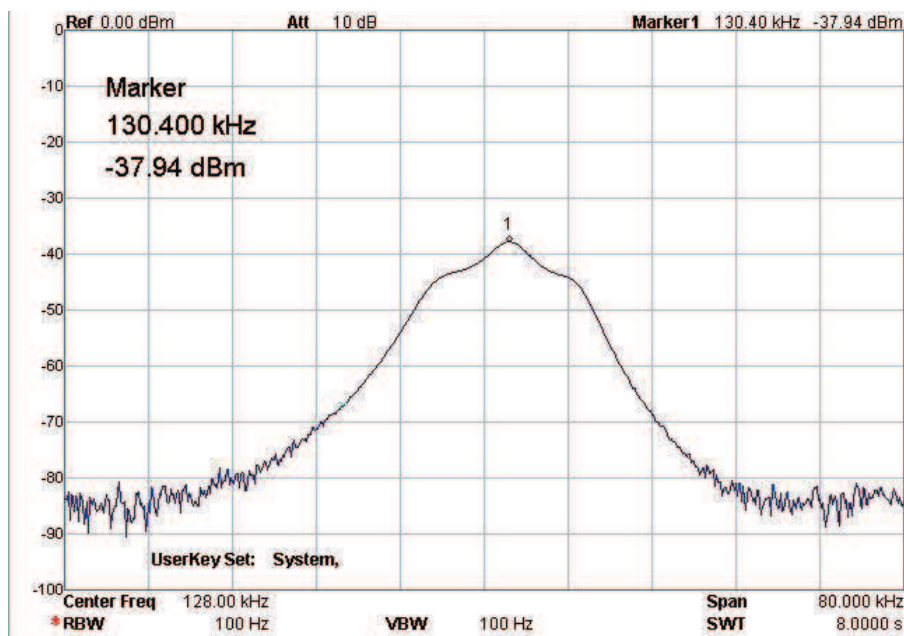
Rys. 12. Schemat modelu filtra pasmowego toru nadawania dla sprzężenia podkrytycznego



Rys. 13. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa modelu filtra dla sprzężenia podkrytycznego

Opierając się na danych otrzymanych z symulacji, skonstruowano filtr rzeczywisty, którego charaktery-

stykę amplitudowo-częstotliwościową przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtra LF przy sprzężeniu podkrytycznym; 1 – charakterystyczne maksimum w paśmie przepuszczania

Jak widać na rys. 14., szerokość pasma w tym przypadku jest, w porównaniu do poprzedniego filtra, mniejsza, ale nachylenie zboczy – większe. Tłumienie filtra w paśmie przepustowym jest znacznie mniejsze, dzięki czemu praca filtra w tym zakresie daje największą selektywność i zasięg działania. Przedstawione charakterystyki obrazujące badania

laboratoryjne zostały zweryfikowane na układach rzeczywistych podczas prób ruchowych w górniczych wyciągach szybowych. W warunkach eksploatacyjnych podczas zastosowania tego typu filtracji selektywność pasma zwiększyła się 15%, a zasięg działania – o ok. 20%. Jednak w trakcie pomiarów eksploatacyjnych na obiekcie rzeczywistym podczas

zastosowania opisywanego rozwiązania ujawniły się również pewne niekorzystne cechy takiego układu. W sytuacjach, gdy w torze przesyłowym pojawiały się sygnały pasożytnicze o szerokim paśmie częstotliwości, generowane np. przez przekształtnik silnika napędowego maszyny, system identyfikował te zakłócenia jako sygnał użyteczny, co prowadziło do utraty informacji o braku możliwości sterowania maszyną. Dlatego też zastosowanie filtrów ze sprzężeniem podkrytycznym i/lub nadkrytycznym w przypadku występowania tego typu zakłóceń powinno być poprzedzone odpowiednimi badaniami, a sam wybór filtrów – wykonany już bezpośrednio podczas instalacji na obiekcie rzeczywistym.

#### 4. PODSUMOWANIE

Eksploatacja złóż na coraz niższych pokładach stawia duże wyzwania dla konstruktorów urządzeń łączności szybowej. W przedstawionym przykładzie pokazano, że nie zawsze zwiększenie możliwości eksploatacyjnych urządzeń można osiągnąć metodą z góry narzuconych rozwiązań, gdyż nawet jeśli istnieją ku temu możliwości techniczne i finansowe, to podczas eksploatacji, a zwłaszcza po remontach i modernizacji układu, np. maszyny wyciągowej, mogą ujawnić się inne uwarunkowania, które dotąd

nie występowały. Dobór parametrów filtrów LF, w zależności od rozwiązania obiektowego, może wpływać na jakość działania urządzenia, przy czym wskazano, że najlepsze rozwiązanie otrzymuje się z uwzględnieniem całości systemu i stanowi optymalną konstrukcję dla urządzenia. Pokazano, że odpowiednie wykorzystanie metod symulacyjnych może w znacznym stopniu uprościć i skrócić prace projektowe. Należy również zauważyć, że na jakość działania systemów, które wykorzystują linę jako nośnik sygnału, duże znaczenie ma jakość wykonania całej instalacji związanej z zasilaniem, sterowaniem i sygnalizacją maszyny wyciągowej. Do kluczowych elementów należą tu filtry przekształtników zasilających silniki maszyn wyciągowych oraz zastosowanie odpowiednio ekranowanych kabli zasilających.

#### Literatura

1. Giel R., Jackiewicz T.: *Propagacja fal elektromagnetycznych w górniczych wyciągach szybowych*. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2010, nr 7 (473).
2. Giel R., Jackiewicz T.: *Rozwój urządzeń łączności szybowej*. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2009, nr 7 (461).
3. Izydorezyk J., Konopacki J.: *Filtry analogowe i cyfrowe*, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
4. Utikal J.: *Sygnalizacje i napędy w górniczych wyciągach szybowych*, Wydawnictwo Górnicze, Katowice 2007.

*Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.*