

TOMASZ JACKIEWICZ  
ROBERT NOWAK  
CARBONEX Sp. z o.o.

GRZEGORZ WIŚNIEWSKI  
Politechnika Wrocławska

# Optimalizacja transmisji danych w systemach łączności wykorzystujących „sprzężenia magnetyczne”

*Mianem łączności wykorzystującej sprzężenia magnetyczne przyjęto nazywać systemy, w których transformacja sygnału odbywa się poprzez elementy indukcyjne, które przekazują i odbierają energię z ośrodka transportującego. Dobrym przykładem takiego rozwiązania jest system łączności i sygnalizacji szybowej, który poprzez sprzężacze ferromagnetyczne przesyła za pomocą lin nośnych bądź wyrównawczych sygnał transmisyjny. Tego typu łączność oprócz swych niewątpliwych zalet, jakimi są duża niezawodność i prostota eksploatacji, posiada również swoje ograniczenia związane z zastosowanym pasmem przenoszenia. W artykule przedstawione zostaną rozważania i pokazane metody pozwalające na maksymalne wykorzystanie dostępnych kanałów transmisyjnych.*

*słowa kluczowe: optymalizacja transmisji danych, sprzężenia magnetyczne, propagacja fal elektromagnetycznych, propagacja sygnału w szybie kopalnianym, górniczy system łączności.*

## 1. WSTĘP

---

W infrastrukturze kopalni głębinowej systemy łączności wykorzystujące „sprzężenie magnetyczne” do propagacji sygnału znajdują zastosowanie głównie w szybach kopalnianych, w których propagacja fal elektromagnetycznych jest znacznie utrudniona ze względu na [2]:

- 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 dużą wilgotność, zasolenie i duży gradient temperatury.

Z wymienionych powyżej powodów początkowe wymagania użytkowników formułowane dla tego typu systemów łączności skupiały się głównie na zapewnieniu odpowiedniej niezawodności działania. Zadaniem tych systemów była jedynie transmisja sygnału fonicznego oraz przesyłanie niewielkiej ilości dyskretnych sygnałów informacyjnych i sterujących [1]. Wraz z upowszechnianiem się stosowania urządzeń łączności szybowej nastąpiła zmiana w definicji wymagań dla tych systemów, użytkownicy bowiem po zaspokojeniu swoich podstawowych potrzeb zaczęli dostrzegać możliwości szerszego ich wykorzystania. Głównym postulatem było wykorzystanie istniejącego kanału transmisji do przesyłania danych z innych urządzeń. W celu zaspokojenia tych wymagań należało w pierwszym kroku odpowiedzieć na pytanie, czy obecnie stosowany system jest zdolny do spełnienia nowych wymagań, czy też należałoby stworzyć nową platformę transmisji danych.

## 2. REALIZACJA ŁĄCZNOŚCI ZA POMOCĄ PROPAGACJI RADIOWEJ

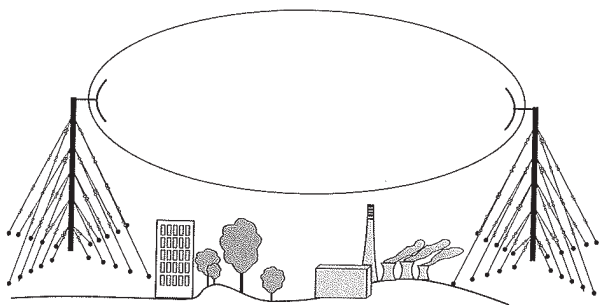
Poprawną pracę systemu transmisji, działającego w szybie kopalnianym, można zrealizować za pomocą różnorodnych środków technicznych [1]. W praktyce spotykane są dwa sposoby realizacji tego zadania: poprzez propagację radiową lub sprzężenie magnetyczne z torem transmisyjnym. W przypadku propagacji radiowej, z uwagi na częstotliwość pracy, systemy charakteryzują się dużą przepustowością łącza, jednak z uwagi na środowisko pracy należy rozważyć i oszacować, jaki wpływ na przepustowość będą miały zjawiska dyfrakcji fali elektromagnetycznej oraz propagacji wielodrogowej, występujące w przypadku obecności przeszkód na drodze propagacji fali. Zgodnie z zasadą Huygensa fala padająca na przeszkodę ulega dyfrakcji, generując fale wtórne, co w konsekwencji powoduje powstawanie interferencji w propagowanej fali [3]. W przekroju poprzecznym fali emitowanej od nadajnika do odbiornika możemy wyróżnić obszary, w których drogi propagacji punktów czoła fali różnią się co najwyżej o  $n\lambda/2$  od drogi propagacji bezpośredniej, nazywane strefami Fresnela. Przestrzenie strefy Fresnela mają kształt elipsoid obrotowych, których ogniska stanowią punkty umieszczenia anten. Ponieważ największa ilość energii transmitowana jest w pierwszej strefie [4], dla uzyskania stabilnej transmisji ważne jest, aby żaden obiekt nie znajdował się w tej przestrzeni. Jej promień można obliczyć za pomocą zależności:

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda r} = 8,66 \sqrt{\frac{r[m]}{f[\text{MHz}]}} \quad (1),$$

gdzie:

$r$  – odległość pomiędzy antenami,  
 $f$  – częstotliwość sygnału.

Na rys. 1. przedstawiono prawidłowe rozmieszczenie anten radiowych na powierzchni.



Rys. 1. Przestrzenna strefa Fresnela

Jak widać, wszystkie obiekty mogące wpływać na emitowaną falę znajdują się poza strefą, natomiast w przypadku, gdy mamy do czynienia z całą powierzchnią ingerującą w pierwszą strefę, do określenia, czy powoduje ona odbicie, czy rozproszenie fali, stosowane jest kryterium Rayleigha opisane zależnością:

$$h < \frac{\lambda}{8\sin\gamma} \quad (2),$$

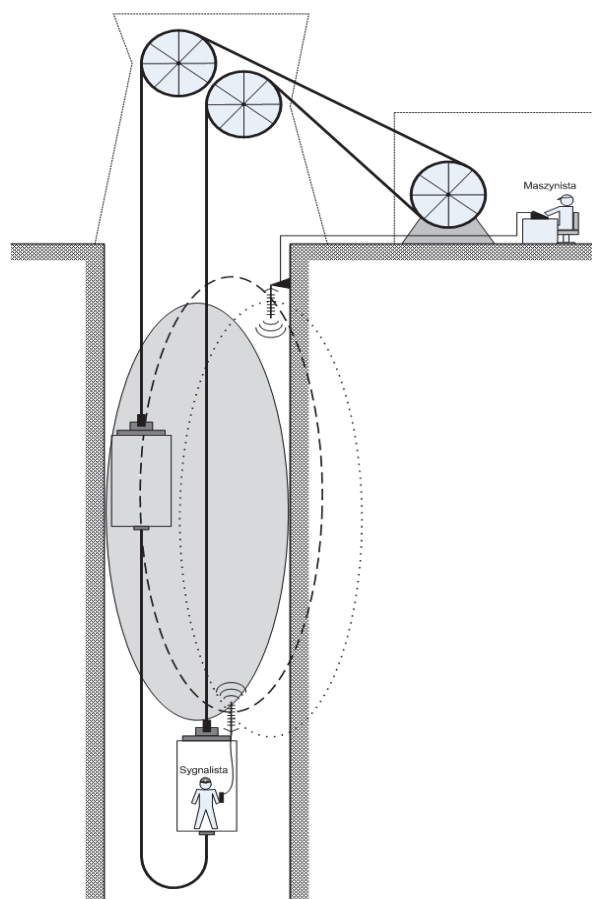
gdzie:

$h$  – wysokość przeszkody,

$\lambda$  – długość fali,

$\gamma$  – kąt padania fali na powierzchnię.

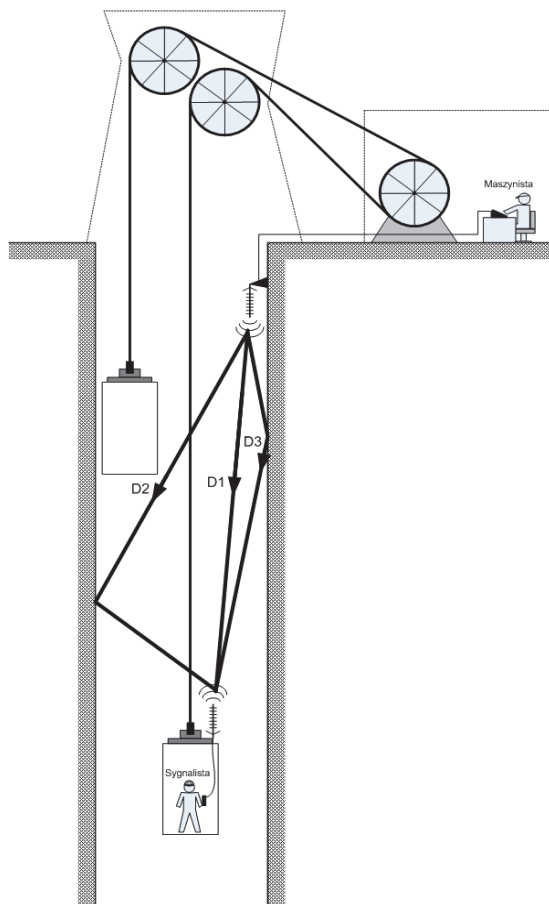
W odniesieniu do rzeczywistych warunków propagacji fal radiowych w szybie kopalnianym z uwagi na wcześniej wymienione ograniczenia należy zauważyć, że nie ma możliwości spełnienia postulatu wolnej pierwszej strefy Fresnela, co zostało pokazane na rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie stref Fresnela w szybie kopalnianym

Szare pole obrazuje, jak powinny być rozmieszczone anteny urządzeń – centralnie w szybie, co nie jest możliwe z uwagi na występowanie lin nośnych naczyń szybowego. Nie jest możliwe również ustawienie anten w jednej linii po którejś ze stron

szybu z uwagi na fakt przemieszczania się naczynia w szybie, co skutkuje występowaniem różnych stref dla poszczególnych anten – zaznaczono to za pomocą dwóch elipsoid. Promień pierwszej strefy Fresnela oszacowany dla skrajnych wartości częstotliwości urządzeń pracujących w szybach – z wykorzystaniem zależności (1) i przy założeniu głębokości szybu 1000 m – wynosi 43 m dla częstotliwości 40 MHz i 5 m dla częstotliwości 2,5 GHz. Graniczna częstotliwość, przy której geometryczne wymiary szybu pozwalają na propagację sygnału z przepustowością teoretyczną, wynosi 750 MHz. Z kolei obmurza szybu spełniają kryterium Rayleigha dla powierzchni odbijającej przy wysokości przeszkód nieprzewyższających odpowiednio: 12 m dla 40 MHz i 2 m dla 2,5 GHz. Ponieważ przeszkody o tej wysokości nie występują w szybach, można uznać całą powierzchnię obmurza jako nierozpraszkającą fali. Przytoczone szacunki są właściwe dla założenia, że przestrzeń wewnątrz szybu będzie pusta. W kolejnym kroku należy uwzględnić występowanie obiektów w szybie, czyli oszacować, jaki wpływ na warunki propagacji będzie miało zjawisko wielodrogowości. Ilustracja tego zjawiska, występującego w szybie kopalnianym, została przedstawiona na rys. 3.



Rys. 3. Ilustracja zjawiska wielodrogowości w szybie kopalnianym

Na powierzchni w najprostszym przypadku mamy do czynienia z propagacją dwudrogową: bezpośrednią pomiędzy antenami oraz pośrednią, odbitą od ziemi. Dla takiego przypadku moc nadajnika potrzebną do zapewnienia prawidłowej transmisji możemy oszacować na dwa sposoby. Pierwszy polega na obliczeniu mocy docierającej do odbiornika dla odległości  $d$  od anteny nadawczej, względem sygnału odniesienia znajdującego się w odległości  $d_0$ , za pomocą zależności:

$$P_R(d) = P(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (3)$$

Sygnał odniesienia musi być mierzony w polu dalekim anteny, wyznaczonym poprzez tzw. odległość Fraunhofera:

$$d_0 = d_f = \frac{2r_{max}^2}{\lambda} \quad (4)$$

gdzie:

$r_{max}$  – maksymalny fizyczny wymiar liniowy anteny,  
 $\lambda$  – długość fali.

W praktyce odległość Fraunhofera dla częstotliwości 40 MHz przyjmuje się 10 m, a dla częstotliwości 2,5 GHz – około 1 m.

Drugi sposób polega na pomiarze natężenia pola elektrycznego w odległości  $d$  od anteny nadawczej w oparciu o wzór Wiedeńskiego:

$$E = \frac{3,94\sqrt{P_T G}}{r^2 \lambda} H_1 H_2 \quad (5)$$

gdzie:

$P_T$  – moc nadajnika,

$G$  – zysk energetyczny anteny nadawczej,

$H_1$  i  $H_2$  – wysokości anten nadawczej i odbiorczej.

W przypadku szybu kopalnianego sytuacja jest bardziej skomplikowana, gdyż nie mamy do czynienia z jedną płaszczyzną odbijającą, lecz przynajmniej dwoma, jak pokazano to na rys. 3. Przy dwudrogowości moc odebrana jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi odległości. Dla szybu, z uwagi na wielodrogowość sygnału, moc odebraną w odległości od anteny nadawczej określa się za pomocą zależności:

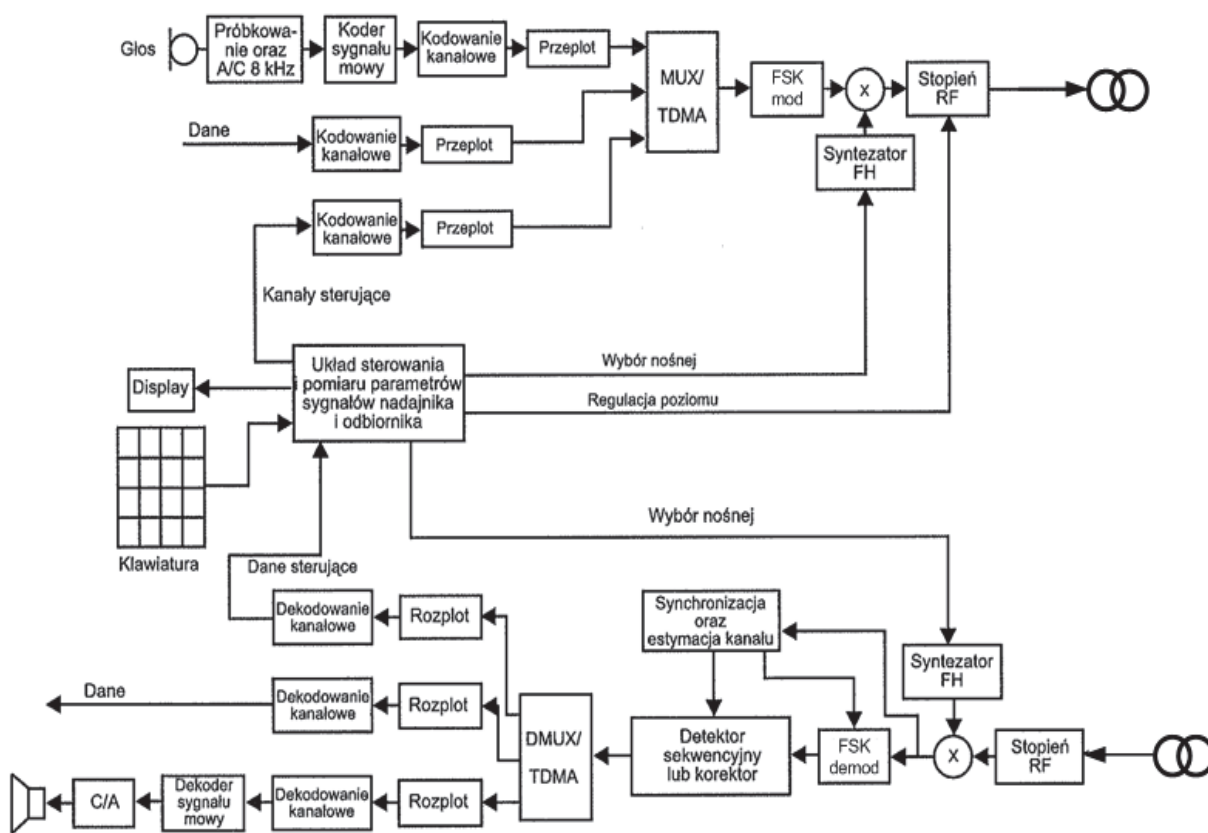
$$P_R(d) = P(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \quad (6),$$

gdzie współczynnik  $\gamma$  zawiera się w przedziale od 2 do 5,5 i zależy od wielu zmiennych środowiskowych, co oznacza, że wartość ta w praktyce będzie inna dla każdego szybu – znacznie utrudnione jest zatem wnioskowanie, jak zachowa się sygnał, w oparciu

o doświadczenie wynikłe z analizy już eksploatowanych instalacji. Dodatkowym zjawiskiem negatywnie wpływającym na rzeczywistą przepustowość kanału jest występowanie dyspersji. Gdy fala radiowa propaguje między anteną nadawczą a anteną odbiorczą różnymi drogami, różnica czasów propagacji powoduje, że dochodzi do dyspersji, czyli rozmycia sygnału radiowego w czasie. Jeżeli różnica ta jest porównywalna z czasem trwania pojedynczego symbolu w sygnale radiowym, występują zakłócenia interferencyjne międzysymbolowe ISI (*Inter Symbol Interference*), które pogarszają bitową stopę błędów sygnału.

### 3. REALIZACJA ŁĄCZNOŚCI ZA POMOCĄ SPRZĘŻENIA MAGNETYCZNEGO Z TOREM TRANSMISYJNYM

Łączność przy użyciu sprzężenia magnetycznego z torem transmisyjnym jest realizowana jako transmisja dwupasmowa z podziałem częstotliwości FDD (*Frequency Division Duplex*), co oznacza występowanie osobnego pasma dla nadawania i odbioru. Jednak takie rozwiązanie nie jest w stanie zapewnić odpowiedniego poziomu przepustowości kanałów transmisji. Na rys. 4. przedstawiono schematyczną



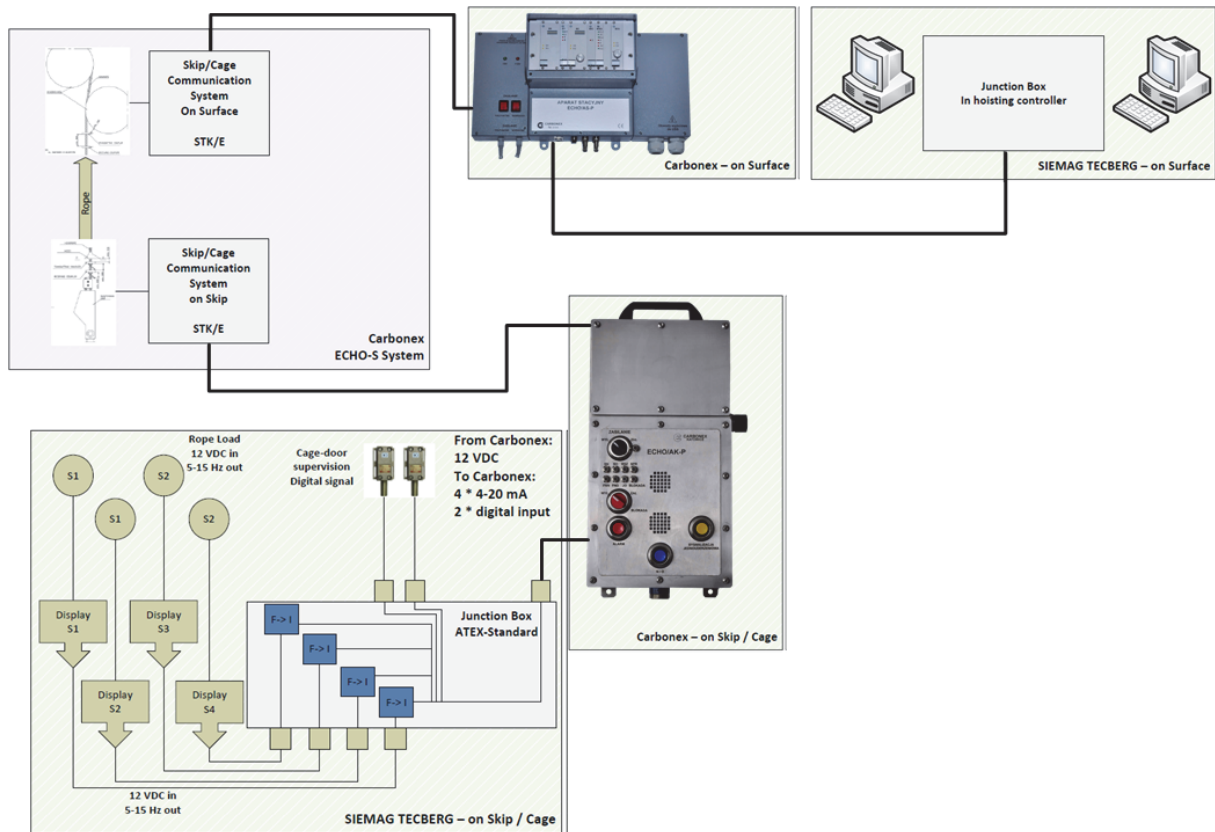
Rys. 4. Schemat blokowy stacji nadawczo-odbiorczej

budowę stacji nadawczo-odbiorczej. Jednym kanałem transmisji przesyłane są dane cyfrowe, sygnały sterujące i sygnały foniczne, stąd występuje współzawodnicтво o dostęp do kanału. Ponieważ z uwagi na zastosowane pasmo częstotliwości nie ma możliwości zwiększenia jego przepustowości, jedynym sposobem na zwiększenie ilości przesyłania danych jest optymalizacja dostępu do kanału poszczególnych bloków funkcjonalnych.

Postulat ten został zrealizowany poprzez implementację w programie sterującym aparatu stacyjnego ECHO/AS algorytmu umożliwiającego zmianę priory-

tetu dostępu do kanału w aparacie klatkowym ECHO/AK w zależności od aktualnych potrzeb użytkownika. Na rys. 5. przedstawiono schemat systemu ECHO-P przeznaczonego do monitorowania naprężeń lin nośnych naczyń wyciągowych. System ten pozwala jednocześnie na prowadzenie rozmów fonicznych pomiędzy załogą znajdującą się w naczyniu wyciągowym a maszynistą maszyny, przesyłanie sygnałów sterujących, w tym sygnałów jednoudrzeniowych, przesyłanie stanu czujników dwustanowych zainstalowanych w naczyniu wyciągowym oraz przesyłaniu sygnałów z czterech pętli prądowych 4-20 mA.

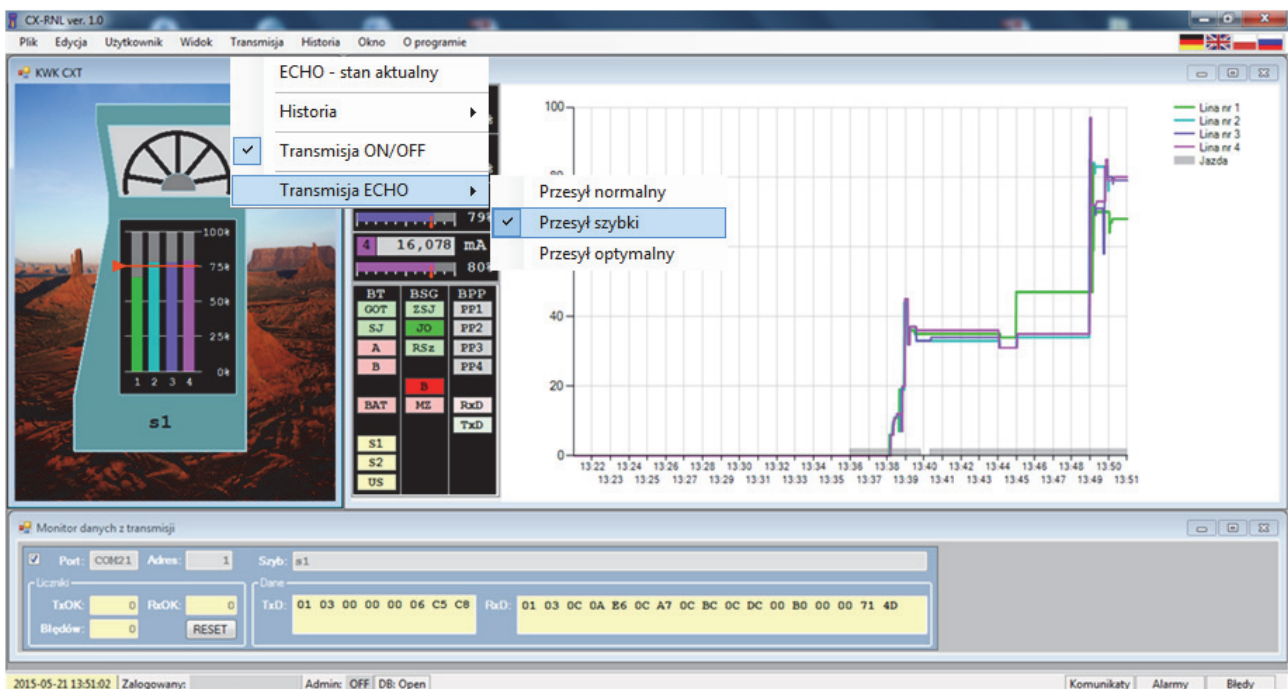




Rys. 5. Schemat systemu ECHO-P w układzie pomiaru naprężenia lin nośnych

W trakcie dobowej eksploatacji wszystkie informacje, które mogą być przesłane przez system, w różnych momentach czasowych posiadają zmienny priorytet ważności, stąd po zaimplementowaniu algorytmu zmiany priorytetu dostępu do kanału transmisyj-

nego użytkownik może sam zdecydować, jakie dane są mu potrzebne w danej chwili najbardziej. Sposób sterowania przesyłem danych został przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6. Ilustracja sposobu sterowania przesyłem danych systemu ECHO

Ekran aplikacji służącej do rejestracji danych oraz sterowania systemem jest wielookienkowy z funkcją szybkiej zmiany języka, w poszczególnych oknach prezentowane są dane pobierane z systemu, tj. aktualny stan naprężenia w poszczególnych linach zawiesia, wykres historyczny naprężeń, stan poszczególnych przycisków na aparacie klatkowym oraz ich wykres historyczny. Sterowanie przepływem danych jest możliwe z menu „Transmisja”. Po wybraniu opcji „Prześlij normalny” system obsługiwany jest czasowo i zdarzeniowo, tzn. dane wysyłane są w chwili naciśnięcia przycisku lub zmiany stanu czujnika oraz zbiorczo raz na minutę. Po wybraniu opcji „Prześlij szybki” system przesyła dane z czujników naprężenia liny w czasie rzeczywistym, dzięki czemu można zaobserwować dynamikę pracy liny, np. w ciągu jednego cyklu wydobywczego. Po wybraniu opcji „Prześlij optymalny” system przesyła dane z czujników uśrednione za zadany okres. Ponieważ w praktyce nie można jednocześnie wykonywać np. rewizji szybu i przeprowadzać pomiaru dynamiki pracy lin, wprowadzony mechanizm w zadowalający sposób spełnia oczekiwania użytkowników.

#### 4. PODSUMOWANIE

---

Dotychczasowe systemy bezprzewodowej łączności szybowej charakteryzowały się małymi wymaganiami co do przepustowości kanału transmisyjnego. Wynikało to zarówno z ich możliwości technicznych,

jak i potrzeb zgłaszanych przez użytkowników. Powodujące się zapotrzebowanie na przesyłanie danych za pomocą tego rodzaju systemu transmisji wymusiło konieczność podjęcia prac nad zwiększeniem przepustowości kanału transmisyjnego. W praktyce realizacja tego postulatu może zostać wykonana przy użyciu nadajników radiowych, co wiąże się z możliwością występowania dużej ilości zjawisk obniżających jakość transmisji lub nadajników wykorzystujących sprzężenie magnetyczne z torem transmisyjnym. Dla tego drugiego przypadku odpowiedni dobór rodzaju transmisji i algorytmu dostępu do kanału transmisyjnego pozwala zapewnić w systemach o małej przepustowości łącza przepływność danych na akceptowalnym poziomie.

#### Literatura

1. Giel R., Jackiewicz T.: *Propagacja fal elektromagnetycznych w górniczych wyciągach szybowych (Propagation of electromagnetic waves in mining shafts)*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2010, nr 7(473).
2. Jackiewicz T., Wiśniewski G.: *Wpływ doboru parametrów filtrów LF na propagację sygnału w szybie kopalnianym (Impact of parameters selection of LF filters on the signal propagation in a shaft)*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2014, nr 6(520).
3. Szóstka J.: *Fale i anteny (Waves and anten nas)*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
4. Wesołowski K.: *Systemy radiokomunikacji ruchomej (Mobile radiocommunication systems)*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.