

*bryg.dr inż. Jacek Chrzęstek*

*dr inż. Andrzej Lubański*

Katedra Techniki Pożarniczej

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

## **Efektywność zastosowania kodów korekcyjnych w dwuleksowym systemie transmisji danych**

### **Streszczenie**

W artykule określono średnią liczbę transmisji w dwuleksowym systemie transmisji danych z decyzyjnym sprzężeniem zwrotnym oraz oszacowano wpływ zastosowania kodów korekcyjnych na szybkość transmisji danych w takim systemie.

**Słowa kluczowe:** transmisja danych, błędy w transmisjach radiowych, kody nadmiarowe, algorytmy systemów transmisji danych

## **Duplex Data Transmission System Using Correction Code**

### **Summary**

The average number of transmissions within a duplex data transmission system with the decision feedback has been defined in the article and the effect of using correction codes to the data transmission rate has been evaluated.

**Keywords:** data transmission, radio transmission errors, redundancy code, data transmission algorithm

### **1. WPROWADZENIE**

Na przestrzeni lat problemom analizy różnych systemów transmisji danych poświęconych zostało wiele publikacji [1, 2, 3, 4, 5], w których jednak brakuje omówienia dwuleksowych systemów transmisji danych. Artykuł ten jest próbą uzupełnienia tych braków. Systemy, o których mowa, stosowane są przy wymianie dużych strumieni danych, np. w systemach rozproszonego przestrzennego przetwarzania danych. Dzięki zastosowaniu kodu nadmiarowego oraz

sprzężenia zwrotnego, dwukierunkowe systemy transmisji danych z decyzyjnym sprzężeniem zwrotnym umożliwiają korygowanie błędów występujących w czasie jednoczesnej, dwukierunkowej transmisji w obu kanałach. Problem jest o tyle ważny, iż zdaniem wielu autorów zajmujących się opisywanymi zagadnieniami, zapewnienie „bezbłędnych transmisji” może rozwiązać zastosowanie kodów korekcyjnych, ale pomija się drugi ważny aspekt, jakim jest wpływ zastosowania kodów tego typu na szybkość przekazywania danych w systemie.

Jako przykład rozpatrzono dwukierunkowy system transmisji danych zbudowany w oparciu o algorytm TOR (ang. *Teleprinting Over the Radio*) [6].

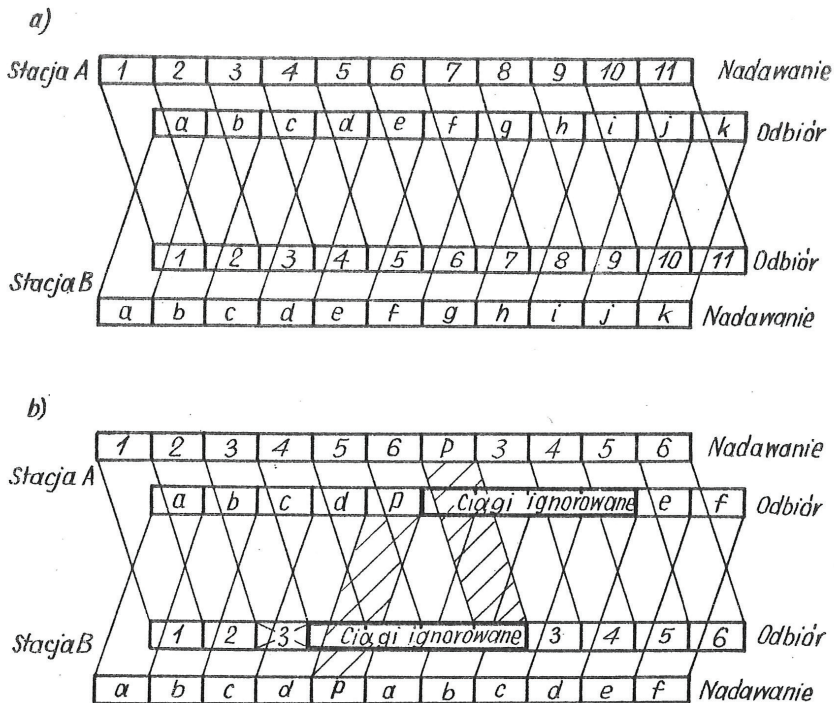
## 2. ZASADA DZIAŁANIA SYSTEMU DUPEKSOwego

Najpierw zostanie rozpatrzona transmisja w warunkach niewystępowania skażenia sygnałów w obu kanałach. W tym przypadku kolejne ciągi  $n$ -elementowe o numerach 1, 2, 3... wysyłane ze stacji A oraz ciągi  $n$ -elementowe o numerach I, II, III, ... wysyłane ze stacji B odbierane są bezbłędnie przez przeciwległe stacje w stałym rytmie, w sposób przedstawiony na rys. 1. Szybkość transmisji sygnałów binarnych w każdym z kanałów określa się wówczas na podstawie zależności:

$$V_s = \frac{i}{n} V_m \quad (1)$$

gdzie:  $i$  – liczba elementów informacyjnych w ciągu  $n$ -elementowym, który nazywać będziemy ciągiem informacyjnym,  
 $V_m$  – szybkość modulacji.

W przypadku gdy w kanale zachodzi skażenie sygnałów w takim stopniu, że odebrany ciąg zostanie zakwestionowany przez stację odbiorczą jako błędny, stacja ta wysyła ciąg kodowy  $P$ , niosący nakaz dla stacji nadawczej (rys. 1b) powtórnej transmisji czterech ciągów. W rozpatrywanym sposobie wymiany informacji obowiązuje zasada, że odebranie ciągu  $P$  bądź zakwalifikowanie odebranego ciągu jako zawierającego błędne elementy, powoduje zignorowanie czterech następnych ciągów oraz wysłanie ciągu  $P$ . W ogólnym przypadku zależnie od wartości opóźnienia sygnału w kanale, nakaz powtórnej transmisji może dotyczyć  $M$  ciągów, przy czym  $M \geq 2$ .



Rys. 1. Zasada działania systemu dwupiętrowego:

a) transmisja nieskażona,

b) transmisja skażona

Źródło: [6].

### 3. ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE WARUNKÓW TRANSMISYJNYCH

Określenie średniej liczby transmisji zostanie przeprowadzone przy następujących założeniach:

5. Kanały wykorzystywane do transmisji danych traktowane są jako bezpamięciowe, stacjonarne i symetryczne.
6. Ciągi przesyłające informację oraz ciągi przesyłające nakaz powtórnej transmisji zawierają jednakową liczbę pozycji –  $n$ .
7. Wyklucza się możliwość „transformacji” ciągu informacyjnego w ciąg decyzyjny (co prowadzi do zwiększenia liczby powtórnych transmisji). Z punktu widzenia średniej liczby transmisji, warunek ten jest praktycznie

spełniony, jeśli stosuje się dobre zabezpieczenie kodowe. Istotnie, prawdopodobieństwo „transformacji” ciągu kodowego w inny ciąg kodowy  $P_n$  można w przybliżeniu określić z zależności [7]:

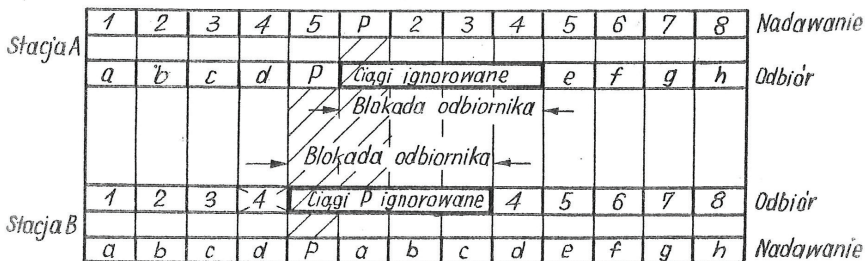
$$P_n \approx 2^{-(n-i)} \cdot P(\geq \Delta, n) \quad (2)$$

gdzie:  $P(\geq \Delta, n)$  oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia w odrębnym ciągu  $n$ -elementowym co najmniej  $\Delta$  błędnych elementów. Wynika stąd, że przy stosowaniu np. zalecanego przez CCITT kodu cyklicznego, generowanego przez wielomian szesnastego stopnia, otrzymujemy:

$$P_n \approx 2^{-16} \cdot P(\geq \Delta, n) < 2^{-16} P_w \quad (3)$$

W takim razie wpływ wielkości  $P_n$  na średnią liczbę transmisji, jako kilkadziesiąt tysięcy razy mniejszy od wpływu  $P_w$ , może być pominięty.

8. Przyjmuje się dla uproszczenia analizy, że opóźnienie sygnałów w obu kanałach jest równe zero (wpływ opóźności kanałów na czas transmisji uwzględnia się poprzez stosowanie powtórnych transmisji obejmujących  $M$  ciągów, liczba ciągów informacyjnych odebranych przez dekodery stacji przeciwległych jest taka sama (różnice nie przekraczają  $M-2$  ciągów)) i nie zależy od czasu trwania transmisji.



Rys. 2. Transmisja skażona przy opóźności kanału równej zero ( $M = 4$ )

Źródło: [6].



## 4. PODSTAWOWE POJĘCIA CHARAKTERYZUJĄCE TRANSMISJĘ

**Transmisja całkowita** – proces zaczynający się od wysłania przez obie stacje nadawcze po jednym ciągu, a kończący się podjęciem w odniesieniu do tych ciągów przez przeciwległe stacje odbiorcze decyzji o znaczeniu „akceptuję ciąg”.

**Transmisja elementarna** – proces zaczynający się od wysłania przez obie stacje nadawcze po jednym ciągu, w tym co najmniej jednego ciągu informacyjnego, a kończący się podjęciem przez przeciwległe stacje odbiorcze jednej z dwu alternatywnych decyzji: „akceptuję ciąg” lub „ignoruję ciąg”.

Jeśli mamy do czynienia z tym procesem przy *k-tej* transmisji tego samego ciągu, mówimy wówczas, że jest to transmisja elementarna o numerze *k*. Decyzja o znaczeniu „ignoruję ciąg” może być podjęta zarówno w przypadku wykrycia błędu w odebranych ciągach, jak i w przypadku niedostępności odbiornika przez okres odpowiadający czasowi blokady odbiornika na *M* ciągów.

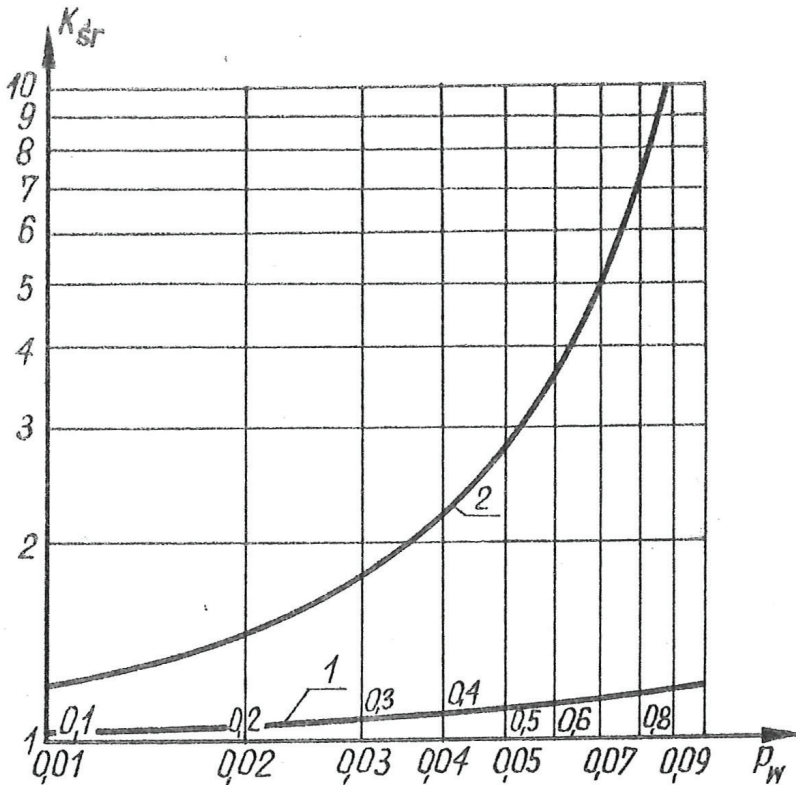
Transmisja całkowita o numerze *k* jest złożona z *k* transmisji elementarnych, z których tylko ostatnia kończy się podjęciem decyzji o znaczeniu „akceptuję ciąg”, przy czym dla jednego kierunku transmisji zachodzi to dokładnie po *k* transmisjach elementarnych, zaś dla drugiego kierunku transmisji – po *j* transmisjach elementarnych. Liczba *j* może przyjmować wartości 1, 2 ... *k*. Zgodnie z rys. 2, np. pary ciągów 1-I, 2-II, 3-III, 4-IV zostały odebrane w czasie transmisji całkowitej o numerze 1, zaś para ciągów 5-V w czasie transmisji całkowitej o numerze 2, przy czym ciąg V został odebrany po pierwszej transmisji elementarnej, zaś ciąg 5 po dwóch transmisjach elementarnych. Wykorzystując metodę zaproponowaną przez J. Seidlera [4] traktującą transmisję jako proces zmiany stanów systemu wraz z oczywistymi założeniami (np. stany odnoszące się do strony źródła danych i stany ujścia danych muszą się przeplatać). W pracy [6] wykazano, że średnia liczba transmisji w analizowanym systemie wyraża zależność (4) przy założeniu iż prawdopodobieństwo wystąpienia błędnego bloku w kierunku A→B i kierunku B→A są takie same:

$$K_s = \frac{1 + 2P_w}{1 - P_w^2} \quad (4)$$

gdzie:

$P_w$  –n prawdopodobieństwo zdarzenia, że ciąg odebrany (przy ustalonym ciągu nadanym) nie należy do zbioru ciągów kodowych.

Przebieg zależności  $K_s = f(P_w)$  wg wzoru (4) dla dwu zakresów wielkości  $P_w$  przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zależności  $K_s$  od  $P_w$ : krzywa 1 odnosi się do zakresu  $0,01 \leq P_w \leq 0,1$ ; krzywa 2 odnosi się do zakresu  $0,1 \leq P_w \leq 1$ .

Źródło: opracowanie własne

## 5. ŚREDNIA SZYBKOŚĆ TRANSMISJI

Średnią szybkość transmisji w systemie dwukierunkowym dla każdego kierunku transmisji określa wzór (5):

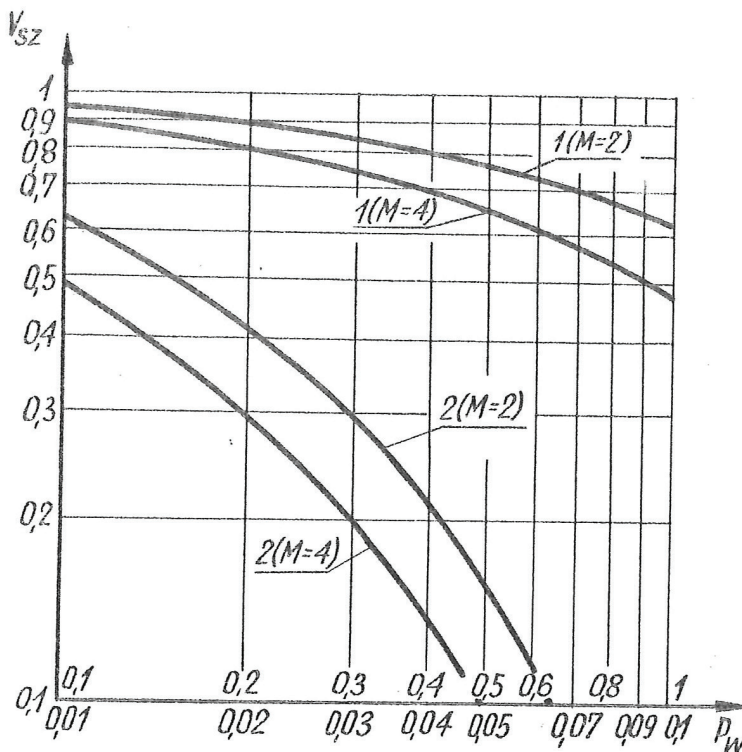
$$V_s = \frac{1}{1 + (K_s - 1)(1 + M)} \frac{i}{n} V_m \quad (5)$$

W wyrażeniu  $(K_s - 1)(1 + M)$  czynnik  $(K_s - 1)$  określa średnią liczbę powtórnych transmisji  $1 + M$  ciągów, zaś w wyrażeniu  $1 + M$ ,  $M$  – oznacza ilość powtarzanych ciągów informacyjnych, 1 – uwzględnia wysyłany po każdej powtórnej transmisji ciąg  $P$ .

Na rys. 4 przedstawiono znormalizowaną średnią szybkość transmisji wyrażoną wzorem:

$$V_{sz} = \frac{V_s}{V_m} \frac{n}{i} = \frac{1}{1 + (K_s - 1)(1 + M)} \quad (6)$$

dla  $M = 2$  oraz  $M = 4$



**Rys. 4.** Zależność  $V_{sz}$  od  $P_w$ ; krzywe 1 odnoszą się do zakresu  $0,01 \leq P_w \leq 1$ ; krzywe 2 odnoszą się do zakresu  $0,1 \leq P_w \leq 1$

Źródło: opracowanie własne

## 6. STATYSTYCZNE CHARAKTERYSTYKI KANAŁÓW

Losowość procesów występujących przy przesyłaniu informacji dyskretnych przesyłanych przez kanały telekomunikacyjne, jak i duża liczba czynników zakłócających, których przyczyny nie zawsze są znane, prowadzą do tego, że bardzo trudno jest określić własność kanałów telekomunikacyjnych, stosując tylko metody teoretyczne. Dlatego aktualnym problemem są prace związane z badaniem, opisem matematycznym i matematycznym modelowaniem rzeczywistych kanałów łączności. Jedną z najbardziej obiektywnych metod badania rzeczywistych kanałów są metody statystyczne.

Stąd też przed analizą i projektowaniem systemów transmisji danych należy określić charakterystyki statystyczne, takie jak np. zniekształcenia izochroniczne, różnorodne charakterystyki błędów itp.

Statystyczne metody badania związane są z dużymi trudnościami, jak np. konieczność zaprojektowania i zbudowania specjalnej aparatury pomiarowej, przeprowadzanie długotrwałych badań, duże straty czasu na obróbkę otrzymanych danych statystycznych, ale za to zabezpieczają podstawy naukowe dla technicznego projektowania systemów teledacyjnych.

Z tego powodu w wielu ośrodkach naukowych w kraju i na świecie dokłada się starań, żeby zbadać własność kanałów telekomunikacyjnych i otrzymać ich charakterystyki statystyczne. Podstawową trudnością przy opracowywaniu inżynierskich metod określania efektywności różnych sposobów zapewnienia wymaganej wierności przesyłania danych jest wybór modelu matematycznego kanału. Praktyka potwierdziła, że przyjęcie prostego modelu o błędach niezależnych – KBS (kanał binarny, symetryczny, stacjonarny) prowadzi do istotnych rozbieżności otrzymanych wyników i eksperymentu. Przyjęcie bardziej złożonych modeli, w których kanał zadaje się dużą liczbą parametrów w praktyce inżynierskiej jest bardzo trudne, jak również eksperymentalne określenie dużej liczby parametrów wymaga długotrwałych badań przy użyciu drogiej i bardzo precyzyjnej aparatury, a otrzymane formuły są bardzo skomplikowane. Oprócz tego wiele z opisanych modeli nie zostało poddane eksperymentalnej weryfikacji, co uniemożliwia korzystanie z nich w praktyce inżynierskiej. W pracy [8], jak również w [9] wyczerpująco opisano sposób badania rzeczywistych kanałów w oparciu o zaprojektowany tester łączy, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 5. Również inne publikacje poświęcone pomiarom

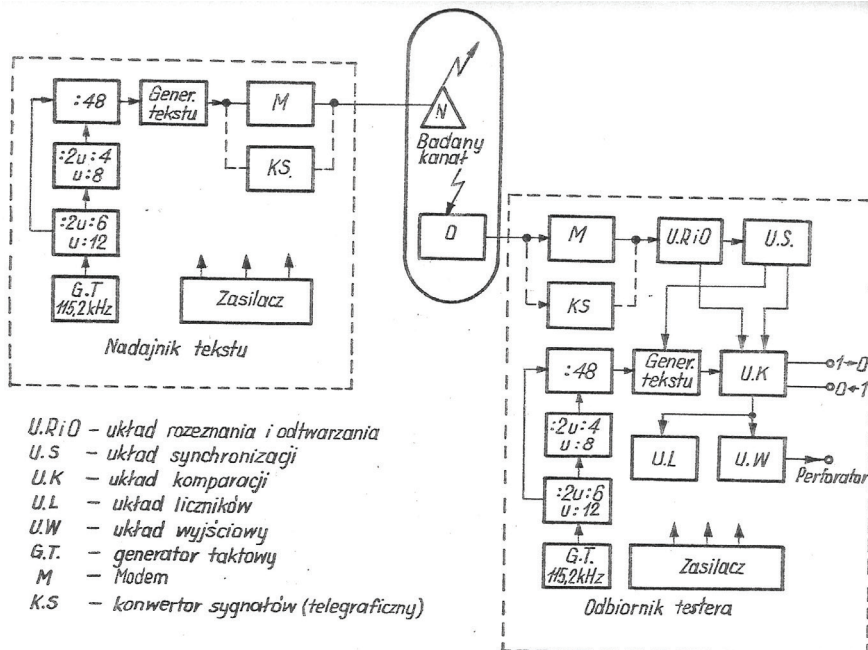
jakości traktów teletransmisyjnych wykorzystywanych w transmisji danych [10, 11] proponują podobną metodykę postępowania.

Dla uzyskanych w ten sposób statystycznych charakterystyk błędów w pracy [8] dla wybranych z obszernego katalogu modeli przeprowadzono weryfikację zgodności statystyk eksperymentalnych z statystykami generowanymi komputerowo.

Przykładowe porównanie rezultatów przedstawiono na rys. 6. Natomiast na rys. 7 przedstawiono porównanie eksperymentu i wyliczeń analitycznych.

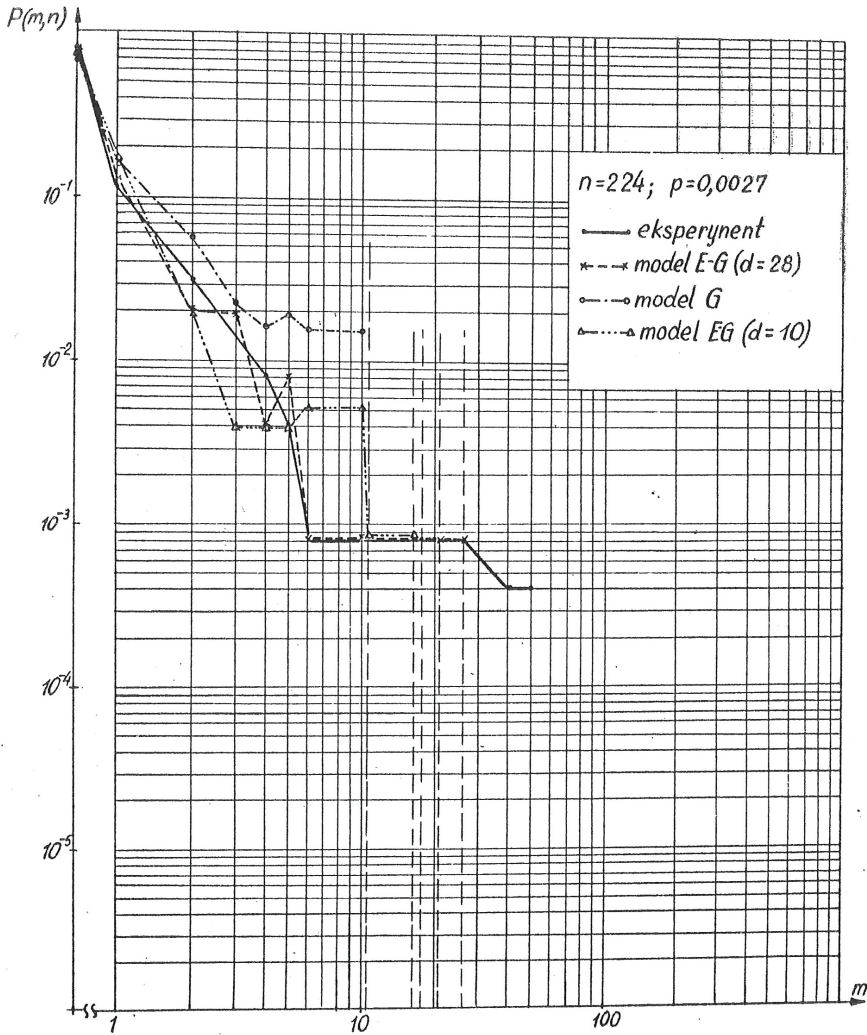
Jak widać z przytoczonych przykładów wystarczająco dobrym dla zastosowań inżynierskich przybliżeniem rzeczywistych kanałów jest dwustanowy model Elliota – Gilberta [12] o parametrze  $d$  zawartym w granicach 28 do 56.

Oczywiście wagowe widmo błędów nie jest jedyną statystyką, która może służyć do określania adekwatności modelu i eksperymentu. Może nią być np. rozkład długości pauz między błędami  $P\{0^k/1\}$ . Również i dla tej statystyki model Elliota – Gilberta daje wystarczająco dobre odwzorowanie eksperymentu.



Rys. 5. Schemat blokowy testera łączny.

Źródło: [8]

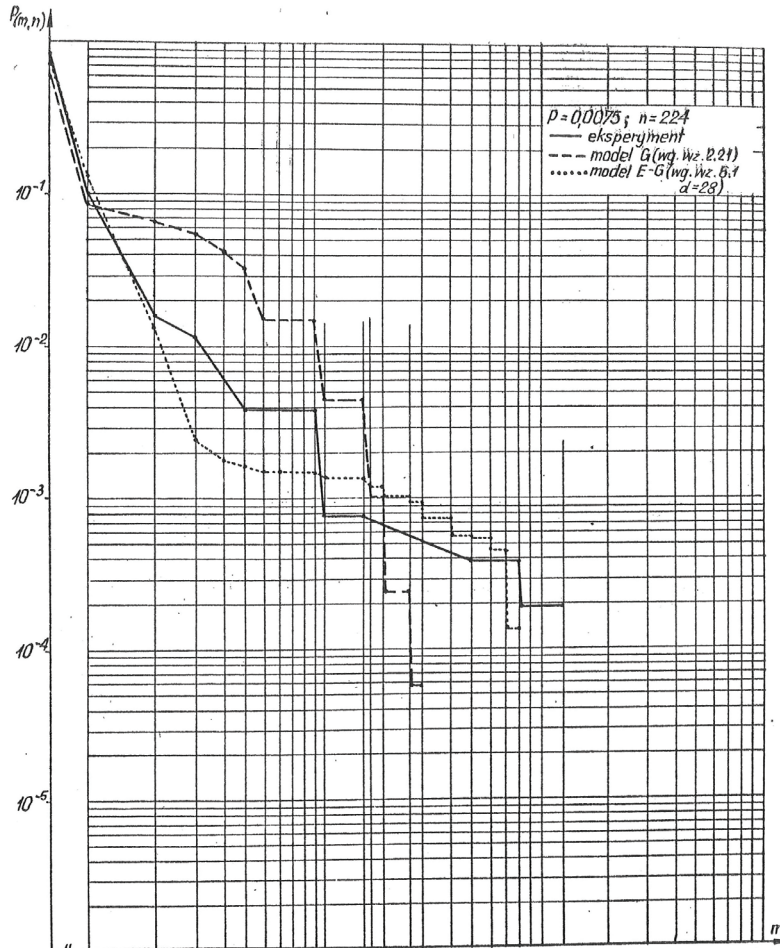


**Rys. 6.** Zestawienie wagowych widm błędów eksperymentalnego  $P(m,n)^E$  i modelowanego  $P(m,n)^M$  dla  $n=224$

$m$  – liczba błędów w bloku  $n$ -elementowym;  $p$  – elementowa stopa błędów; G – model Gilberta; E – G – model Elliota-Gilberta;  $d$  – liczba elementów bezbłędnych rozdzielających kolejne „paczki” błędów.

Źródło: opracowanie własne



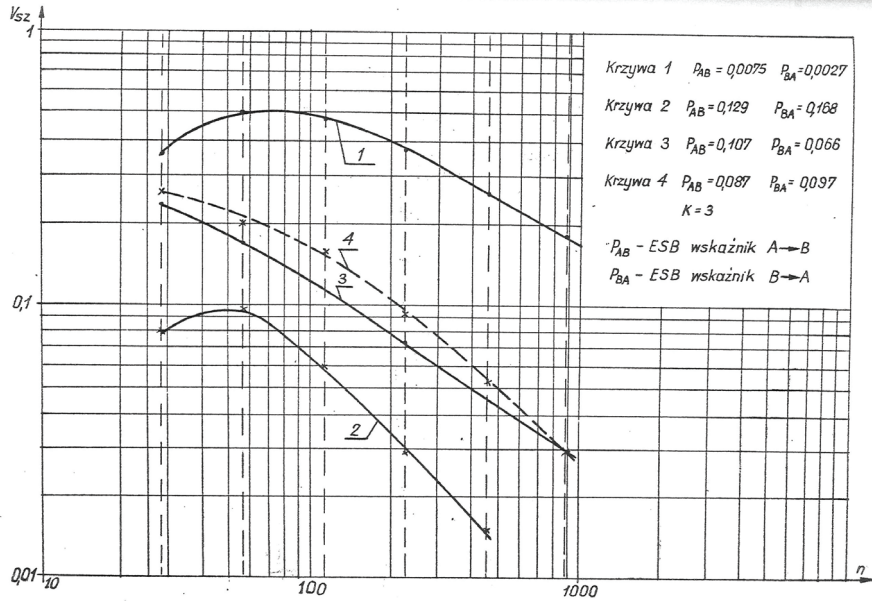


**Rys. 7.** Przebieg statystyki  $P(m, n)$  dla przypadku małej ESB (eksperyment i wyliczenia analityczne dla modeli dwustanowych)

Źródło: opracowanie własne

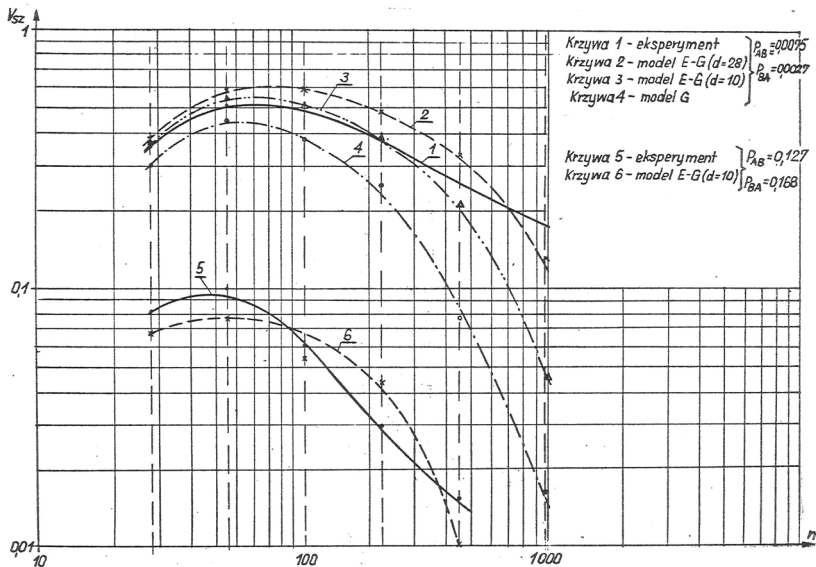
## 7. OKREŚLENIE PARAMETRÓW SYSTEMU

Pod zamodelowany na komputerze algorytm pracy systemu „podłożono” zarówno eksperymentalny (rys. 8), jak i modelowany ciąg błędów (rys. 9), co pozwoliło określić znormalizowaną szybkość transmisji w systemie dla różnych parametrów modeli.



Rys. 8. Przebieg znormalizowanej szybkości transmisji  $V_{sz} = f(n)$ , gdzie:  $n$  - długość bloku

Źródło: opracowanie własne



Rys. 9. Przebieg  $V_{sz} = f(n)$  dla ciągów generowany maszynowo

Źródło: opracowanie własne

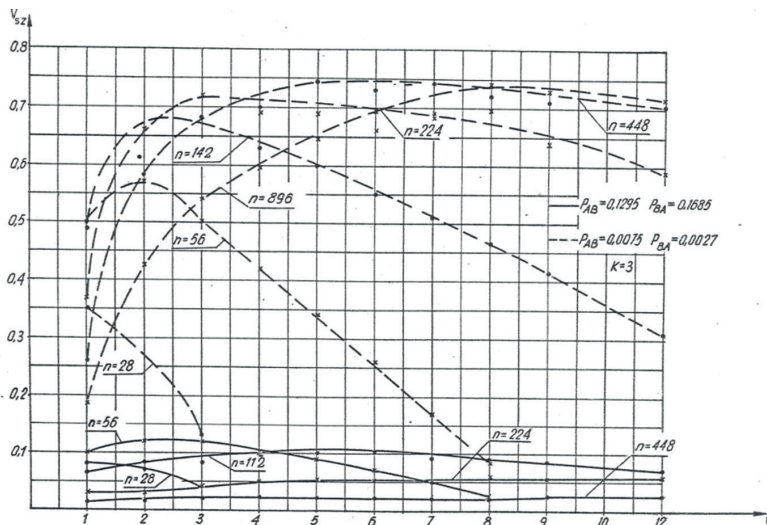


W obu przypadkach (eksperyment i modelowanie) optymalną długością bloku gwarantującego największą szybkość przekazywania danych jest blok o długości 60 do 120 elementów.

## 8. ZASTOSOWANIE KODÓW KOREKCYJNYCH

Kody korekcyjne [13, 14, 15, 16] mające w stosunku do kodów detekcyjnych większą liczbę elementów nadmiarowych, tzn. nie niosących informacji, a więc ich stosowanie może zwiększyć szybkość transmisji, gdyż nie ma wtedy potrzeby powtarzania bloków (patrz pkt. 2) lub zmniejszyć szybkość przekazywanych danych ze względu na konieczność wprowadzenia dużej liczby elementów nadmiarowych.

Aby odpowiedzieć na tak sformułowany problem w trakcie symulacji, polecono komputerowi „nie zauważać” błędów pojedynczych, podwójnych itd. w zależności od stosowanego kodu korekcyjnego, zmniejszając oczywiście odpowiednio zawartość informacyjną bloku. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Przebieg zależności  $V_{sz}$  w funkcji ( $W$ -l) „korygowanych” błędów

Źródło: opracowanie własne

Dla bloku 56-elementowego przy korekcji pojedynczego błędu szybkość wzrasta z 0,5 do 0,57, ale przy korekcji błędów podwójnych spada do 0,5. Można

zaryzykować wniosek, iż korygowanie błędów o krotnościach większych niż pojedyncze, nie zwiększa szybkości transmisji a sam zabieg niewątpliwie komplikuje aparaturę.

## 9. WNIOSKI

Z przedstawionych rozważań i cytowanej literatury wynika, że wystarczająco dobre dla inżynierskiego określania szybkości transmisji w systemach TD, zwłaszcza pracujących na łączach radiowych KF odwzorowania rzeczywistego ciągu błędów, dają modele dwustanowe z dwoma stanami błędnymi. Stosowanie modeli o większej liczbie stanów prowadzi do bardzo skomplikowanych zależności, co znacznie utrudnia możliwość korzystania z nich. Optymalną długością bloku dla systemu duplexowego z transmisją ciągłą jest blok 60–120-elementowy. Stosowanie kodów korekcyjnych poprawiających więcej niż jeden błąd jest nieopłacalne, gdyż nie prowadzi do zwiększenia szybkości transmisji. Interesującym problemem może być pytanie, jaki jest wpływ algorytmu systemu TD, np. z adresowym powtarzaniem na szybkość transmisji? Odpowiedź na tak sformułowany problem jest przedmiotem dalszych prac autorów.

## LITERATURA

- [1] Drózd J., Efektywna szybkość transmisji w systemach transmisji danych ze sprzężeniem zwrotnym decyzji. *Rozprawy elektrotechniczne* 1974, z. 3.
- [2] Hryckiewicz J., Malec B., Sposoby określania możliwości transmisyjnych systemów przesyłania danych. *Biuletyn WAT* 1977, nr 1.
- [3] Haykin S., Systemy telekomunikacyjne. WkiŁ, Warszawa 2004.
- [4] Seidler J., Systemy przesyłania informacji cyfrowych. WNT, Warszawa 1976.
- [5] Seidler J., Analiza i synteza sieci łączności dla systemów teleinformatycznych. WNT Warszawa 1979.
- [6] Hryckiewicz J., Lubański A., Średnia liczba transmisji w systemie duplexowym. *Biuletyn WAT* 1975, nr 7.
- [7] Пугров Л.П., Элементы теории передачи дискретной информации, СВЯЗЬ, Москва 1972.

- [8] Lubański A.: Szybkość radiowej transmisji danych cyfrowych w systemie duplexowym. WAT, Warszawa 1978.
- [9] Lubański A., Ponikiewski J.: Zestaw pomiarowy łączy teledycyjnych. Materiały Konferencji „Automatyzacja procesów badaniowych w telekomunikacji”, Warszawa 1978.
- [10] Bogucki J., Pomiary stopy błędów urządzeń cyfrowych linii radiowych. *Telekomunikacja i techniki informacyjne* 2006, nr 1–2.
- [11] Jasiński M., Stasiński T., Właściwości i metody pomiarowe kanału radiowego. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010.
- [12] Lubański A. Chrzęstek J., Identyfikacja binarnych kanałów radiowych. *Zeszyty Naukowe SGSP* 2014, nr 51.
- [13] Drózdź J., Podstawy kodowania nadmiarowego. Wyd. PW 1978.
- [14] Huffman C.W., Pless V.:=, Fundamentals of Error-Correcting Code. Cambridge University Press 2003.
- [15] Jackowski S., Urban R., Wpływ adaptacyjnego doboru wielkości przepływu i parametrów kodu na jakość transmisji w kanale UKF. *Biuletyn WAT* 2009, nr 2.
- [16] Urban R., Zastosowanie kodów LPDC do poprawy jakości transmisji w kanale radiowym UKF. Materiały konferencji KSTiT 2007.