

dr inż. KAZIMIERZ MIŚKIEWICZ

dr inż. ANTONI WOJACZEK

Politechnika Śląska, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa

dr inż. PIOTR WOJTAS

Institut Technik Innowacyjnych EMAG

Problemy niezawodności kopalnianych systemów telekomunikacyjnych

Reliability of mining telecommunications systems

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań niezawodności kopalnianych sieci telekomunikacyjnych. W badaniach wykorzystano empiryczne dane zebrane w formie ankiety w oddziałach łączności polskich kopalń. Dla linii kablowych zaproponowano modele niezawodnościowe z rzeczywistą odnową. Dla oceny niezawodności linii kablowych zastosowano parametr przecięcia CC obliczony odrębnie dla kabli szybowych, sieci magistralnych, sieci oddziałowych oraz pojedynczych par. Zaproponowano model niezawodnościowy łącza abonenckiego. Przeprowadzono analizę niezawodności sieci telekomunikacyjnych zawierających zadaną liczbę łączy w różnych konfiguracjach. Wyniki analiz zilustrowano przykładami liczbowymi.

The objective of the article is to present the results of reliability tests of mining telecommunications networks. During the tests the empirical data were used, which had been collected by means of a questionnaire in the telecommunications departments of Polish mines. For cable lines, reliability models with real recovery were proposed. To assess the reliability of cable lines, the cable cut (CC) parameter was used, calculated separately for shaft cables, bus networks, department networks, and single pairs. A reliability model of an exchange line was proposed. The reliability analysis was conducted for telecommunications networks which contain a certain number of lines in different configurations. The results of the analyses were demonstrated by numerical examples.

1. WSTĘP

W aktualnie eksploatowanych kopalnianych systemach telekomunikacyjnych można wyróżnić:

- urządzenia stacyjne takie jak: centrala telefoniczna, centrala alarmowa, centrala telemetryczna, centrale systemów geofizycznych (sejsmometria, sejsm akustyka) itp. wraz z barierami iskrobezpiecznymi (w kopalniach metanowych),
- sieć telekomunikacyjną (głównie z zastosowaniem telekomunikacyjnych kabli miedzianych) wraz osprzętem (kablownie, szafy, skrzynki, złącza itp.),
- urządzenia końcowe takie jak: telefony, telefonsygnalizatory, metanomierze i inne mierniki gazometryczne, geofony, sejsmometry itp.

1. INTRODUCTION

In currently exploited mining telecommunications systems it is possible to distinguish the following:

- station devices such as: telephone exchange, alarm exchange, telemetric exchange, geophysical systems exchange (seismic measurements, seismic acoustics), etc., including intrinsically safe barriers (in methane mines),
- telecommunications network (mainly with the use of copper telecommunications cables) with fittings (cable chambers, distribution frames, boxes, connections, etc.),
- terminating devices, such as telephones, communication and signalling devices, methane meters and

Dla oceny niezawodności systemów telekomunikacyjnych przyjmuje się, że są to systemy składające się z pewnych obiektów (elementów) połączonych między sobą w odpowiednią strukturę.

Definicje i parametry dotyczące szeroko rozumianej niezawodności są podawane w publikacjach normatywnych, naukowych czy podręcznikach np.:

- zalecenia ITU-T – zalecenia E¹.800, G.911,
- normy EN 61078, PN-EN 61025, PN-EN 60812, PN-93/N-50191, PN-77/N-04005,
- podręczniki [15, 2, 11, 7, 8 i inne...].

Niezawodność danego obiektu możemy zdefiniować jako zdolność obiektu do wypełniania zadanych funkcji w wymaganym przedziale czasu, przy jednoczesnym nie przekraczaniu obciążeń dopuszczalnych.

Z punktu widzenia niezawodności każdy z elementów systemu może znajdować się w jednym z dwóch stanów:

- stan zdadności (*up state*) – w którym obiekt jest zdolny do wypełniania wymaganych funkcji,
- stan niezadności (*fault, down state*) – w którym obiekt nie jest zdolny do wypełnienia wymaganych funkcji.

W pracy dowolnego obiektu w przypadkowych chwilach występuje na przemian ciąg zdarzeń:

- utrata zdadności, uszkodzenie,
- przywrócenie zdadności, odnowa (po naprawie lub wymianie).

W teorii niezawodności rozpatruje się trzy podstawowe modele obiektów [Migdalski 1982]:

- obiekt nieodnawialny (istotny jest czas do powstania uszkodzenia),
- obiekty z natychmiastową odnową (natychmiast po uszkodzeniu następuje przywrócenie zdadności – mamy do czynienia z odnową natychmiastową); tego rodzaju model może być stosowany jeżeli czasy trwania odnowy są pomijalnie małe w stosunku do czasów pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami obiektu,
- obiekty o skończonym czasie odnowy (z rzeczywistą odnową).

Kopalniane sieci telekomunikacyjne potraktowano jako zbiór elementów o skończonym czasie odnowy.

other gas measuring equipment, geophones, seismometers, etc.

The definitions and parameters of widely understood reliability are given in standards, scientific publications or manuals, e.g.:

- recommendations of ITU-T¹ – recommendations E.800, G.911,
- standards EN 61078, PN-EN 61025, PN-EN 60812, PN-93/N-50191, PN-77/N-04005,
- manuals [15, 2, 11, 7, 8 and others ...].

The reliability of a given object can be defined as its capacity to perform the assumed functions in the required period of time and, simultaneously, with no exceeding of admissible loads.

From the point of view of reliability, each element of the system can be in one of the following two states:

- up state – when the object is able to perform the required functions,
- fault or down state – when the object is not able to perform the required functions.

In the operations of any object in random moments, there are the following sequences of events occurring in turns:

- loss of up-state condition, failure,
- restoration of up-state condition, recovery (after repair or replacement).

In the reliability theory there are three basic object models considered [Migdalski 1982]:

- non-renewable objects (what is important is the time before the failure occurs),
- immediate-recovery objects (the restoration of up-state condition occurs immediately after the failure – immediate recovery), such a model can be used if the duration periods of the recovery are negligibly small with respect to the duration periods between successive failures of the object,
- objects with finite recovery time (real-recovery objects).

Mining telecommunications networks have been treated as sets of elements with finite recovery time.

¹ International Telecommunications Union – Telecommunications Standardization Sector (Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny – Sektor Normalizacji w Telekomunikacji)

¹ International Telecommunications Union – Telecommunications Standardization Sector

2. MODEL NIEZAWODNOŚCIOWY OBIEKTU Z RZECZYWISTĄ ODNOWĄ

Podstawowymi parametrami niezawodnościowymi obiektów z rzeczywistym czasem odnowy są:

- intensywność uszkodzeń λ ,
- intensywność odnowy μ ,

Intensywność uszkodzeń (chwilowa) $\lambda(t)$ jest to granica stosunku prawdopodobieństwa warunkowego, że chwila uszkodzenia obiektu znajdzie się w danym przedziale czasu $(t, t+\Delta t)$ do długości tego czasu Δt dla Δt dążącego do zera [PN-93/N-50191].

Intensywność naprawy (chwilowa) $\mu(t)$ jest to granica stosunku prawdopodobieństwa warunkowego zakończenia obsługi (naprawy, odnowy) obiektu w przedziale czasu $(t, t+\Delta t)$ do długości tego czasu Δt dla Δt dążącego do zera. [PN-93/N-50191].

- W przypadku stałej wartości intensywności uszkodzeń λ oraz intensywności naprawy μ jako wskaźników niezawodnościowych używa się też:

- średniego czasu do uszkodzenia $MTTF^2$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

- średniego czasu trwania odnowy $MTTR^3$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

- średniego czasu między uszkodzeniami $MTBF$

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3)$$

Dla niezawodnościowej oceny pracy obiektu istotne jest prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu w stanie zdatności. Tego rodzaju prawdopodobieństwo jest nazywane gotowością A . W przypadku stałej wartości μ oraz λ gotowość A jest równa:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

Używa się również pojęcia niegotowości U , która jest równa:

$$U = 1 - A \quad (5)$$

Dla elementów sieci telekomunikacyjnej przyjęto stałą wartość intensywności uszkodzeń λ oraz stałą wartość intensywności naprawy μ .

2. RELIABILITY MODEL OF A REAL-RECOVERY OBJECT

The basic reliability parameters of objects with real-recovery time are:

- failure intensity λ ,
- recovery intensity μ ,

Failure intensity (temporary) $\lambda(t)$ is a boundary of the conditional probability rate that the moment of the object failure is in the given time interval $(t, t+\Delta t)$ to the duration of this time Δt for Δt approaching zero [PN-93/N-50191].

Recovery intensity (temporary) $\mu(t)$ is a boundary of the conditional probability rate of the service (repair, recovery) completion in the given time interval $(t, t+\Delta t)$ to the duration of this time Δt for Δt approaching zero. [PN-93/N-50191].

- In the case of constant values of failure intensity λ and recovery intensity μ the following are also used as reliability indicators:

- Mean Time To Failure $MTTF^2$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

- Mean Time To Recovery $MTTR^3$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

- Mean Time Between Failures $MTBF$

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3)$$

For the reliability assessment of the object operations, the probability of the object up-state condition is of key importance. Such probability is called availability A . In the case of constant values μ and λ the availability A is equal to:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

Another term which is used is unavailability U . Unavailability is equal to:

$$U = 1 - A \quad (5)$$

For the elements of the telecommunications network, constant values of failure intensity λ and recovery intensity μ were assumed.

² MTTF – skrót od nazwy *Mean Time To Failure*

³ MTTR – skrót od nazwy *Mean Time To Restoration/Recovery*

² MTTF – *Mean Time To Failure*

³ MTTR – *Mean Time To Restoration/Recovery*

3. ANALIZA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Przy rozpatrywaniu analizy złożonych systemów zawierających elementy o znanych parametrach niezawodnościowych rozpatruje się szereg struktur, z których najważniejsze są następujące [8, 7, 15, 2]:

- struktura szeregową,
- struktura równoległa,
- struktury mieszane,
- struktury z elementami progowymi.

System o szeregowej strukturze niezawodnościowej złożony z n elementów (bloków) jest w stanie zdadności tylko wtedy, gdy wszystkie jego elementy są w stanie zdadności.

Zdadność systemu szeregowego wymaga zdadności wszystkich elementów składowych, a do jego uszkodzenia wystarczy awaria jednego elementu. W przypadku stałych wartości μ_i i λ_i poszczególnych elementów składowych intensywność uszkodzeń systemu λ jest równa:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

a gotowość A_u jest równa:

$$A_u = \prod_{i=1}^n A_i \quad (7)$$

W systemie równoległym o n elementach do zdadności systemu wystarczy zdadność jednego tylko elementu. System równoległy można potraktować jako system posiadający $n-1$ elementów rezerwowych.

Jeżeli system zawiera n elementów o wykładniczych funkcjach niezawodności z jednakowymi intensywnościami uszkodzeń, tzn. $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$, to wartość oczekiwana czasu zdadności $MTTF$ jest równa:

$$MTTF_u = \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}\right) \cdot MTTF \quad (8)$$

gotowość systemu A_u jest równa:

$$A_u = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (9)$$

Jako strukturę progową k z n można uważać system zawierający n elementów, który będzie w stanie zdadności, jeżeli co najmniej k jego elementów będzie w stanie zdadności ($1 \leq k \leq n$).

3. SYSTEMS RELIABILITY ANALYSIS

During the analysis of complex systems which contain elements with recognized reliability parameters, a number of structures are taken into account, and the most important are the following [8, 7, 15, 2]:

- serial structure,
- parallel structure,
- mixed structures,
- structures with threshold elements.

A system with serial reliability structure, composed of n elements (blocks), is in the up state when, and only when all its elements are in the up state.

The up-state condition of a serial system requires that all its elements are in the up-state condition and the system fails when just one element fails. In the case of constant values μ_i and λ_i of particular system components, the failure intensity λ of the system equals:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

while availability A_u equals:

$$A_u = \prod_{i=1}^n A_i \quad (7)$$

A parallel system with n elements is in the up-state condition if just one element is in the up-state condition. A parallel system can be treated as a system with $n-1$ spare elements.

If a system contains n elements with exponential reliability functions of the same failure intensities, i.e. $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$, the expected value of the up-state time $MTTF$ equals:

$$MTTF_u = \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}\right) \cdot MTTF \quad (8)$$

while the availability A_u of the system equals:

$$A_u = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (9)$$

A threshold structure k from n is a system with n elements which will be in the up-state condition if at least k of its elements are in the up-state condition ($1 \leq k \leq n$).

W przypadku, gdy gotowości elementów wchodzących w skład struktury progowej są jednakowe, tzn. $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_n = A$ gotowość układu można obliczyć korzystając z zależności wynikających z rozkładu dwumianowego. Dla układu progowego k z n , gotowość A_{kzn} jest określona zależnością:

$$A_{kzn} = \sum_{r=0}^{n-k} \binom{n}{r} \cdot A^{n-r} \cdot (1-A)^r \quad (10)$$

W przypadku gdy parametry niezawodnościowe elementów wchodzących w skład struktur progowych nie są jednakowe, gotowość systemu określa się przez analizę równoważnych struktur szeregowo-równoległych [8, 16].

4. OKREŚLANIE PARAMETRÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH TELEKOMUNIKACYJNEJ SIECI KABLOWEJ W KOPALNIACH NA PODSTAWIE WYNIKÓW ANKIETY

Ocenę parametrów niezawodnościowych kopalnianej sieci telekomunikacyjnej dokonano na podstawie wyników ankiety przeprowadzonej w Centrum EMAG w ramach realizacji projektu badawczego 9T12A 03116 pt.: Badanie niezawodności strukturalnej kopalnianej sieci telekomunikacyjnej [12].

4.1. Model niezawodnościowy telekomunikacyjnych linii kablowych

Przyjęto jako podstawowy parametr niezawodnościowy kabli telekomunikacyjnych tzw. **parametr przecięcia kabla CC^4** . Jest to parametr określający dla jakiej długości kabla występuje średnio jedno uszkodzenie na rok. Bezpośrednie tłumaczenie z angielskiego nie jest najszcześliwsze, lecz nie znaleziono innego. Tego rodzaju parametr jest cytowany w literaturze dotyczącej głównie telekomunikacyjnych linii kablowych światłowodowych [3, 13, 14]. W przyjęciu takiego parametru tkwi założenie, że prawdopodobieństwo uszkodzenia kabla telekomunikacyjnego zależy między innymi od jego długości. Wtedy średni czas między uszkodzeniami MTBF (wyrażony w godzinach) dla kabla o długości l_k [km] można obliczyć z zależności:

$$MTBF = \frac{CC \cdot 365 \cdot 24}{l_k} \quad (11)$$

⁴ CC – ang. *Cable Cut*

In the case when the availabilities of the elements within the threshold structure are the same, i.e. $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_n = A$, the availability of the system can be calculated with the use of dependencies derived from binomial distribution. For the threshold system k from n , the availability A_{kzn} is determined by the following dependency:

$$A_{kzn} = \sum_{r=0}^{n-k} \binom{n}{r} \cdot A^{n-r} \cdot (1-A)^r \quad (10)$$

In the case when the reliability parameters of the elements within the threshold structures are not the same, the availability of the system is determined by means of the analysis of equivalent serial-parallel structures [8, 16].

4. DETERMINING RELIABILITY PARAMETERS OF A TELECOMMUNICATIONS CABLE NETWORK IN MINES ON THE BASIS OF QUESTIONNAIRE RESULTS

The assessment of reliability parameters of a mining telecommunications network was conducted on the basis of the results of a questionnaire carried out in EMAG within the research project 9T12A 03116: Testing structural reliability of a mining telecommunications network [12].

4.1. Reliability model of telecommunications cable lines

The so called **cable cut parameter CC^4** was adopted as the basic reliability parameter of telecommunications cables. This parameter determines for which length of the cable there is an average of one failure per year. The parameter is quoted in literature on light-pipe telecommunications cable lines [3, 13, 14]. The adoption of this parameter assumes that the failure probability of a telecommunications cable depends, among others, on its length. Then the mean time to failure (expressed in hours) for a cable with the length of l_k [km] can be calculated from the following dependency:

$$MTBF = \frac{CC \cdot 365 \cdot 24}{l_k} \quad (11)$$

⁴ CC – *Cable Cut*

Tabela 1/Table 1

Parametry niezawodnościowe sieci kablowej
Reliability parameters of a cable network

Kopalnia Mine	Kable szybowe Shaft cables	Kable magistralne Bus cables	Kable oddziałowe Department cables	Pary Pairs
CC, km	110	400	8	1910
MTTR, h	40	17	6	8

Dołową kablową sieć telekomunikacyjną podzielono na 3 części:

- kable szybowe,
- dołowa sieć magistralna,
- dołowa sieć oddziałowa.

Wyodrębniono również parę jako odrębny element, który może ulec uszkodzeniu niezależnie od uszkodzenia kabla. W wyniku analizy danych z ankiety uzyskano następujące średnią wartość parametru CC oraz średnie czasy odnowy MTTR dla różnych segmentów kopalnianej sieci telekomunikacyjnej, przedstawione w tabeli 1 [16].

Parametry niezawodnościowe (MTBF, MTTF) najczęściej stosowanych urządzeń w kopalnianych sieciach telekomunikacyjnych określono na podstawie ankiety [12].

Dla urządzeń dołowych uzyskano następujące średnie czasy między uszkodzeniami:

- skrzynki rozdzielcze – 2 lata,
- telefony – 8 miesięcy,
- sygnalizatory – 9 miesięcy,
- metanomierze – 3 miesiące.

5. MODEL NIEZAWODNOŚCIOWY NATURALNEGO ŁĄCZA ABONENCKIEGO

Przy budowaniu modelu niezawodnościowego łącza abonentckiego przyjęto następujące założenia:

- łącze posiada szeregową strukturę niezawodnościową obejmującą następujące elementy:
 - kabel szybowy (wraz z kablem powierzchniowym do urządzeń stacyjnych),
 - kabel w magistralnej sieci telekomunikacyjnej na poziomie,
 - kabel w sieci oddziałowej;
- poszczególne 3 rodzaje kabli (szybowe, magistralne, oddziałowe) odwzorowują uszkodzenia wszystkich (lub większości par w kablu),
- w modelu występuje dodatkowy element (para) odwzorowujący uszkodzenie danej pojedynczej pary,

The underground cable telecommunications network was divided into three parts:

- shaft cables,
- underground bus network,
- underground department network.

Additionally, a pair was distinguished as a separate element which may fail independently of the cable failure. As a result of the analysis of data from the questionnaire, the following mean value of the CC parameter was achieved, along with mean times to recovery for different segments of the mining telecommunications network, presented in Table 1 [16].

Reliability parameters (MTBF, MTTF) of the devices most frequently used in mining telecommunications networks were determined on the basis of the questionnaire [12].

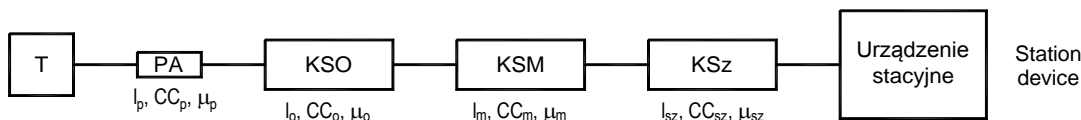
For underground devices, the following mean times between failures were obtained:

- distribution boxes – 2 years,
- telephones – 8 months,
- signalling devices – 9 months,
- methane measuring devices – 3 months.

5. RELIABILITY MODEL OF A NATURAL EXCHANGE LINE

For the construction of a reliability model of an exchange line, the following were assumed:

- the line has a serial reliability structure comprising the following elements:
 - a shaft cable (together with a surface cable for station devices),
 - a cable in the bus telecommunications network on a certain level,
 - a cable in the department network;
- particular three types of cables (shaft, bus and department cables) map the failures of all (or majority) pairs in a cable,
- there is an extra element (pair) in the model which maps the failure of a given single pair,



Rys. 1. Model niezawodnościowy łącza abonenckiego; T – urządzenie końcowe, PA – para dla łącza abonenckiego, KSO – kabel w sieci oddziałowej, KSM – kabel w sieci magistralnej, KSz – kabel szybowy

Fig. 1. Reliability model of an exchange line; T – terminating device, PA – pair for an exchange line, KSO – cable in a department network, KSM – cable in a bus network, KSz – shaft cable

Tabela 2/Table 2

Wyniki obliczeń parametrów niezawodnościowych łącza abonenckiego o zadanych długościach poszczególnych segmentów kabli
Calculation results of reliability parameters of an exchange line with assumed lengths of particular cable segments

	Szyb Shaft	Sieć magistralna Bus network	Sieć oddziałowa Department network	Para Pair	Urządzenie końcowe Terminating device	Łącze Line
l, km	1	4	1	6.5		
CC, km	110	400	8	1910		
$MTTR, h$	40	17	6	8	8	
μ	2.50E-02	5.88E-02	1.67E-01	1.25E-01	1.25E-01	
λ	1.04E-06	1.14E-06	1.43E-05	3.88E-07	7.61E-05	9.29E-05
A	0.999958	0.999981	0.999914	0.999997	0.999392	0.999242
$U \cdot 10^6$	42	19	85.6	3.1	608.5	758

• dla poszczególnych elementów składowych sieci (kable szybowy, magistralny oddziałowy, pojedyn- cza para) znane są następujące parametry niezawodnościowe (przyjęte jako średnie wartości obliczone z ankiety):

- parametr przecięcia CC (CCsz, CCm, CCo, CCp),
- długość poszczególnych segmentów kabla l (l_{sz}, l_m, l_o, l_p),
- średni czas odnowy MTTR (MTTRsz, MTTRm, MTTRo, MTTRp).

Poszczególne parametry niezawodnościowe obliczono wg zależności (2, 4, 5, 11). W tabeli pokazano przykład wyników obliczeń parametrów niezawodnościowych łącza abonenckiego dla założonych długości kabli w poszczególnych segmentach sieci

W tabeli 2 pokazano wyniki obliczeń dla łączy abonenckich o typowych długościach kabli szybowych, magistralnych i oddziałowych. Dla łączy obliczono intensywność uszkodzeń λ_k bez urządzenia końcowego, intensywność uszkodzeń λ_w z urządzeniem końcowym, gotowość A_k bez urządzenia końcowego, gotowość A_w z urządzeniem końcowym, niegotowość U_k bez urządzenia końcowego, niegotowość U_w z urządzeniem końcowym. Dla przyjętych danych największy udział w parametrach niezawodnościowych łącza ma urządzenie końcowe oraz sieć oddziałowa.

• for particular components of the network (shaft cable, bus and department cable, single pair), the following reliability parameters have been recognized (adopted as mean values calculated on the basis of the questionnaire):

- CC parameter (CCsz, CCm, CCo, CCp),
- lengths of particular sections of the cable l (l_{sz}, l_m, l_o, l_p),
- mean time to recovery MTTR (MTTRsz, MTTRm, MTTRo, MTTRp).

Particular reliability parameters were calculated according to dependencies (2, 4, 5, 11). The table features an example of calculation results of reliability parameters of an exchange line for the assumed cable lengths in particular segments of the network.

Table 2 features calculation results for exchange lines of typical lengths of shaft cables, bus cables and department cables. For these lines, failure intensity λ_k was calculated without a terminating device, failure intensity λ_w with a terminating device, availability A_k without a terminating device, availability A_w with a terminating device, unavailability U_k without a terminating device, and unavailability U_w with a terminating device.

6. MODELE NIEZAWODNOŚCIOWE SYSTEMÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH

W przypadku systemu telekomunikacyjnego zawierającego pewną liczbę łączy abonenckich istotnym problemem jest kryterium oceny niezawodności systemu. Jeżeli jako kryterium niezawodności systemu przyjęć zdatność wszystkich łączy, to niezawodność systemu praktycznie nie zależy od struktury sieci telekomunikacyjnej. Natomiast jak przyjmujemy, że zdatność systemu jest określona jako zdatność tylko pewnej liczby łączy, to tak zdefiniowana niezawodność zależy od struktury sieci telekomunikacyjnej, co zostanie wykazane w następujących rozdziałach.

6.1. Model niezawodnościowy systemu telekomunikacyjnego z dwoma łączy abonenckimi

Rozpatrzono sieć zawierającą 2 łączy abonenckie w następujących konfiguracjach:

- oba łączy są prowadzone we wspólnych liniach kablowych,
- każde łączy jest prowadzone w odrębnej linii kablowej,
- jedno urządzenie końcowe z parą główną i rezerwową prowadzonymi w odrębnych liniach kablowych (przyjęto, że para rezerwowa pracuje jako rezerwa obciążona).

Jako stan zdatności systemu przyjęto zdatność jednego lub dwóch łączy (dla przypadku a i b) lub zdatność urządzenia końcowego z parą główną lub rezerwową. Na rysunku 2 pokazano schematy niezawodnościowe analizowanych przypadków 2 łączy.

Obliczono wartości liczbowe wskaźników niezawodności systemów z dwoma łączy dla typowych długości poszczególnych segmentów linii kablowych, jak w tabeli 2.

W tabeli 3 pokazano zastosowane wzory oraz wyniki obliczeń parametrów niezawodnościowych systemu 2 łączy (zdatność systemu, to zdatność co najmniej jednego łączy) w konfiguracjach przedstawionych na rysunku 2. Obliczenia wykazały, że pod względem niezawodności lepszy jest układ 2 odrębnych linii kablowych, ponieważ intensywność uszkodzeń w stosunku do wspólnego kabla nieco spadła z $67 \cdot 10^{-6}$ do $62 \cdot 10^{-6}$, natomiast niegotowość spadła z $147 \cdot 10^{-6}$ do $0,6 \cdot 10^{-6}$.

6. RELIABILITY MODELS OF TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

In the case of a telecommunications system which has a certain number of exchange lines, an important issue is the criterion to assess the reliability of this system. If one assumes that the reliability criterion of the system is the up-state condition of all lines, then the system reliability practically does not depend on the structure of the telecommunications network. On the other hand, if one assumes that the up-state condition of the system is defined as the up-state condition of only a certain number of lines, the reliability defined this way depends on the structure of the telecommunications network. This will be demonstrated in the further sections of this article.

6.1. Reliability model of a telecommunications system with two exchange lines

A network with two exchange lines was investigated in the following configurations:

- both lines run in common cable lines,
- each line runs in a separate cable line,
- one terminating device with a main pair and a stand-by pair running in separate cable lines (it was assumed that the stand-by pair works as a load reserve).

The up state of one or two lines (for the cases a and b) or the up state of a terminating device with a main pair or stand-by pair were assumed as the up state of the whole system. Figure 2 presents reliability diagrams of the analyzed cases for the system with two lines.

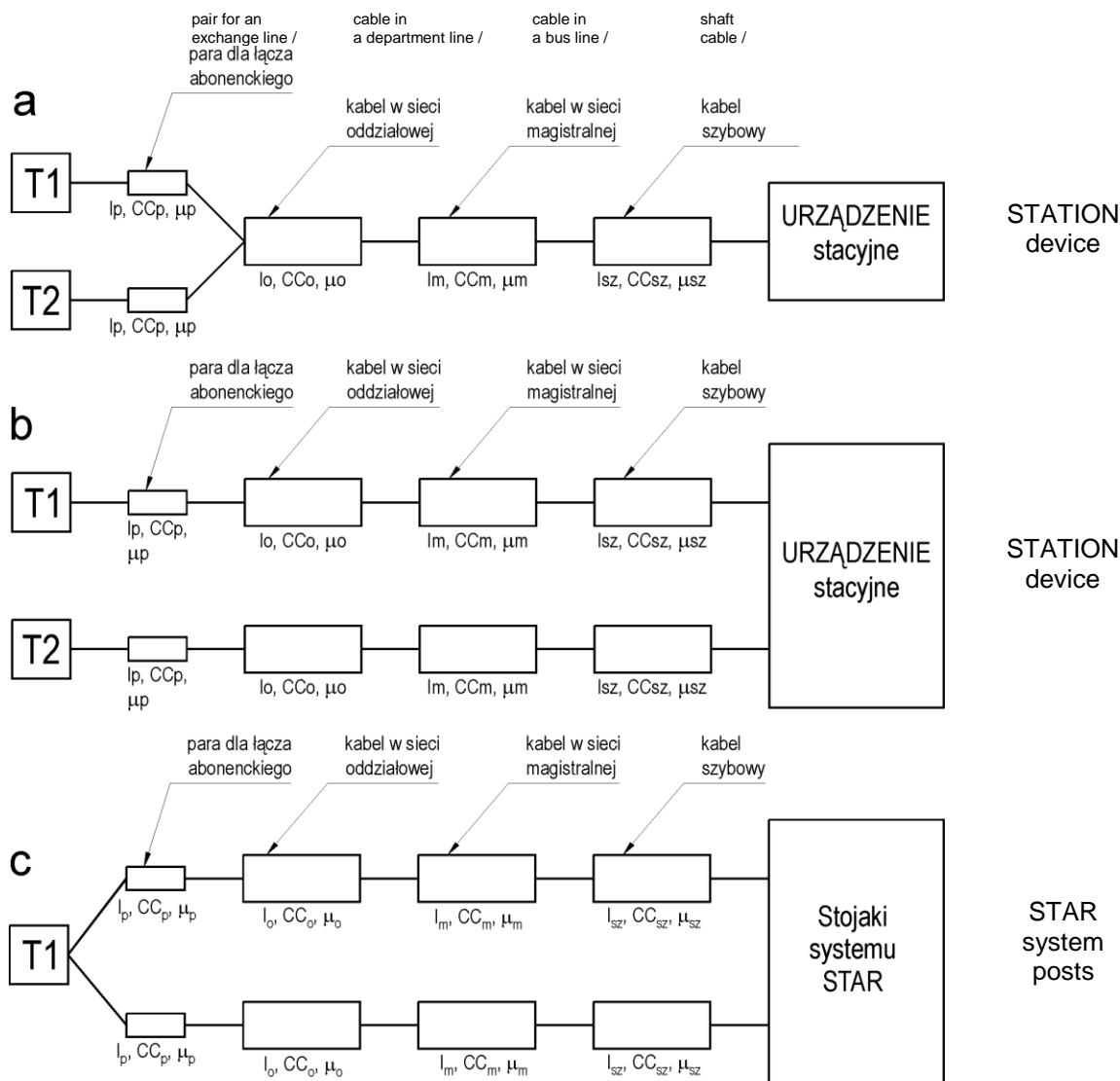
Numerical values of reliability indicators were calculated for the systems with two lines for typical lengths of particular line sections, like in Table 2.

Table 3 features the applied formulas and calculation results of reliability parameters for a system with two lines (up state of the system is the up state of at least one line) in the configurations presented in Figure 2. The calculations demonstrated that the system of two separate lines is better in terms of reliability because the failure intensity with respect to that of the common cable dropped a bit from $67 \cdot 10^{-6}$ to $62 \cdot 10^{-6}$, while the unavailability dropped from $147 \cdot 10^{-6}$ to $0.6 \cdot 10^{-6}$.

Tabela 3/Table 3

Wyniki obliczeń wskaźników niezawodnościowych dla układu dwóch łącz abonenckich o zadanych długościach poszczególnych segmentów kabli
Calculation results of reliability parameters of a system with two exchange lines with assumed lengths of particular cable segments

	Wspólna linia kablowa Common cable line	Oddzielne linie kablowe Separate cable lines	Urządzenie końcowe z parą rezerwową Terminating device with a stand-by pair
λ	$\frac{\lambda_T + \lambda_p + \lambda_o + \lambda_m + \lambda_{sz}}{1,5}$	$\frac{\lambda_T + \lambda_p + \lambda_o + \lambda_m + \lambda_{sz}}{1,5}$	$\lambda_T + \frac{\lambda_p + \lambda_o + \lambda_m + \lambda_{sz}}{1,5}$
A	$(1 - (1 - A_T \cdot A_p)^2) \cdot A_o \cdot A_m \cdot A_{sz}$	$1 - (1 - A_T \cdot A_p \cdot A_o \cdot A_m \cdot A_{sz})^2$	$A_T (1 - (1 - A_p \cdot A_o \cdot A_m \cdot A_{sz})^2)$
$\lambda \cdot 10^6$	67	62	87
A	0,9998	0,99999943	0,9993
$U \cdot 10^6$	147	0,6	608



Rys. 2. Model niezawodnościowy układu dwóch łącz;
 a) oba łącza we wspólnej linii kablowej, b) każde łącze w oddzielnej linii kablowej,
 c) urządzenie końcowe z parą rezerwową

Fig. 2. Reliability model of a system with two lines
 a) both lines in a common cable line, b) each line in a separate cable line,
 c) terminating device with a stand-by pair

Układ z parą rezerwową posiada najmniej korzystne wskaźniki niezawodnościowe, co wynika z tego, że o niezawodności łącza w głównej mierze decyduje niezawodność urządzenia końcowego, a w układzie z parą rezerwową jest tylko jedno urządzenie końcowe. Tego rodzaju rozwiązanie było możliwe do zastosowania w systemie alarmowo-rozgłoszeniowym STAR. Ze względu na niezbyt korzystne właściwości niezawodnościowe i potrzebę rozbudowy urządzeń stacyjnych o dodatkowe porty tego rodzaju, rozwiązanie nie zostało przewidziane w nowszym systemie łączności alarmowo-rozgłoszeniowej SAT.

6.2. Model niezawodnościowy systemu telekomunikacyjnego z czterema łączami abonenckimi

Rozpatrzono system telekomunikacyjny z łączami naturalnymi zawierający 4 urządzenia końcowe (np. telefony sygnalizatory) w 3 konfiguracjach (rys. 3):

- urządzenia końcowe podłączone do urządzenia stacyjnego czterema odrębnymi liniami kablowymi (każde urządzenie końcowe oddzielną linią kablową),
- urządzenia końcowe podłączone do urządzenia stacyjnego dwoma liniami kablowymi (po dwa urządzenia końcowe we wspólnym kablu),
- urządzenia końcowe podłączone do urządzenia stacyjnego jedną wspólną linią kablową.

Dla każdej konfiguracji rozpatrzono parametry niezawodnościowe, takie jak: intensywność uszkodzeń λ , gotowość A oraz niegotowość U , definiując stan zdadności systemu w następujący sposób:

- zdadność systemu odpowiada zdadności jednego łącza,
- zdadność systemu odpowiada zdadności dwóch łącz,
- zdadność systemu odpowiada zdadności trzech łącz,
- zdadność systemu odpowiada zdadności czterech łącz.

Niezawodność systemu z czterema urządzeniami końcowymi przy różnych kryteriach zdadności obliczono przy wykorzystaniu struktur progowych, tworząc zastępcze schematy szeregowo-równoległe i upraszczając je, korzystając z zapisu analitycznego struktury [16]. Do przekształceń i upraszczania wyrażeń analitycznych zastosowano skrypty napisane w środowisku MATLAB.

Przyjęto następujące długości poszczególnych segmentów sieci telekomunikacyjnej jak w tabeli 2. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4.

The system with a stand-by pair has the least advantageous reliability indicators due to the fact that the unavailability of the line is, to a large extent, the result of the unavailability of the terminating device, and in the system with a stand-by line there is only one terminating device. Such a solution was possible to use in the STAR alarm and communication system. Due to disadvantageous reliability properties and the need to expand the station devices by extra ports, the solution was not envisaged in the latter version of the SAT alarm and communication system.

6.2. Reliability model of a telecommunications system with four exchange lines

A telecommunications system with natural lines was investigated. The system had 4 terminating devices (e.g. telephones, signalling devices) in three configurations (Fig. 3):

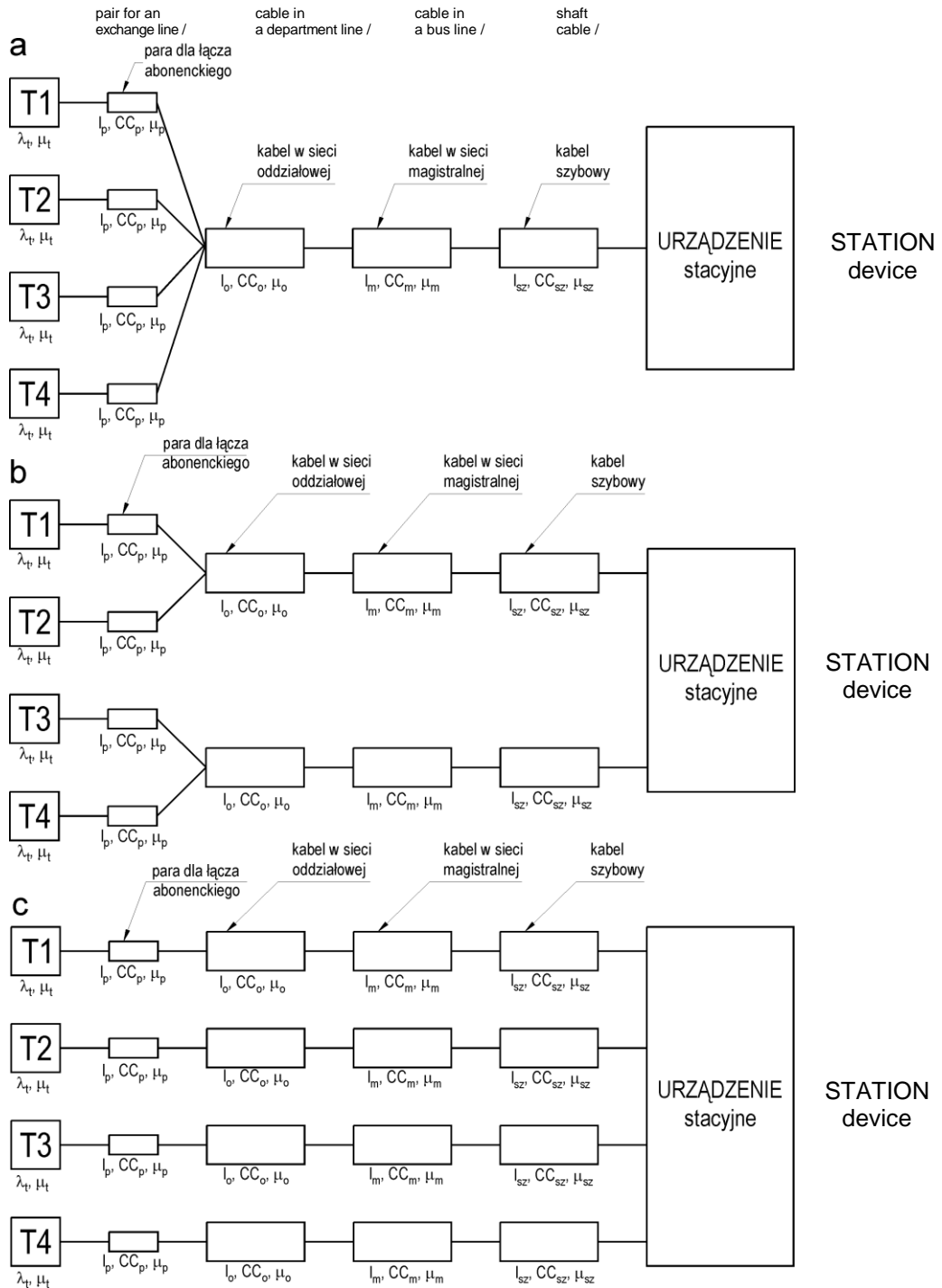
- terminating devices connected to a station device by means of four separate cable lines (each terminating device with a separate cable line),
- terminating devices connected to a station device by means of two cable lines (two terminating devices per one common cable),
- terminating devices connected to a station device by means of one common cable line.

For each configuration, reliability parameters were looked into, such as: failure intensity λ , availability A and unavailability U , while the up state condition of the system was defined in the following way:

- up state of the system corresponds to the up state of one line,
- up state of the system corresponds to the up state of two lines,
- up state of the system corresponds to the up state of three lines,
- up state of the system corresponds to the up state of four lines.

The reliability of the system with four terminating devices, at different up-state criteria, was calculated with the use of threshold structures by making substitute serial-parallel diagrams and simplifying them by means of the analytical record of the structure [16]. For the transformations and simplifications of analytical expressions, the MATLAB-developed scripts were used.

The lengths of particular segments of the telecommunications network are presented in Table 2. The calculation results can be seen in Figure 4.



Rys. 3 Modele niezawodnościowe układu czterech łączy;

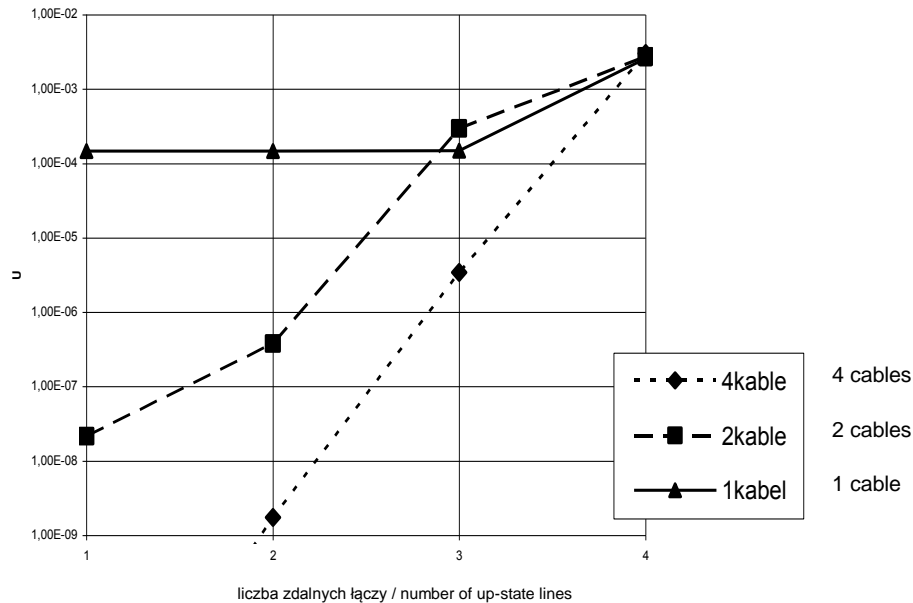
a) łączy we wspólnej linii kablowej, b) łączy w dwóch liniach kablowych, c) łączy w czterech liniach kablowych

Fig. 3 Reliability models of a system with four lines;

a) lines in a common cable line, b) lines in two cable lines, c) lines in four cable lines

W przypadku jednej wspólnej linii kablowej zmniejszenie liczby zdalnych łączy poniżej 3 nie powoduje zmniejszenia niegotowości U systemu. Dla 1, 2, lub 3 zdalnych łączy niegotowość systemu jest nieco większa od niegotowości linii kablowej ($1,47 \cdot 10^{-4}$).

In the case of one common cable line, the reduced number of up-state lines below three does not result in lower unavailability U of the system. For one, two or three up-state lines, the system unavailability is slightly higher than the unavailability of the cable line ($1,47 \cdot 10^{-4}$).



Rys. 4. Zależność niegotowości systemu telekomunikacyjnego z czterema urządzeniami końcowymi od założonej liczby zdalnych łączy dla kilku konfiguracji systemu (jedna linia kablowa, dwie linie kablowe, cztery linie kablowe)

Fig. 4. Dependency of the unavailability of a telecommunications system with four terminating devices on the assumed number of up-state lines for several system configurations (one cable line, two cable lines, four cable lines)

W przypadku dwóch linii kablowych przyjęcie zdadności 3 łączy powoduje nieznaczne powiększenie zdadności systemu w stosunku do jednej linii kablowej. Jest to spowodowane tym, że dla zdadności systemu muszą być zdadne obie linie kablowe, a wzrost niezdadności wynika z podwojonej długości dwóch linii kablowych w stosunku do jednej linii kablowej. Przyjęcie zdadności 2 lub 3 łączy jako zdadności systemu powoduje zmniejszenie niegotowości U w porównaniu z jedną linią kablową. Wynika to z tego, że uszkodzenie 1 linii kablowej powoduje, że 2 łączy w drugiej nieuszkodzonej linii kablowej są zdadne, a to oznacza zdadność systemu.

W przypadku czterech linii kablowych przy zdadności 1, 2, lub 3 łączy otrzymamy najmniejszą wartość niegotowości U . Dla 1 łączy zdadnego otrzymano wartość niegotowości $U = 3,3 \cdot 10^{-13}$. Jeżeli uwzględnimy niezawodność urządzenia stacyjnego, to niegotowość U systemu wraz z urządzeniem stacyjnym nie osiągnie tak małych wartości. Dla central telefonicznych parametr MAIDT⁵, który w przybliżeniu odpowiada niegotowości nie powinien być większy od 30 min/rok [6, 17], co odpowiada niegotowości $1,14 \cdot 10^{-4}$. Wtedy niegotowość systemu nie będzie mniejsza od niegotowości centrali.

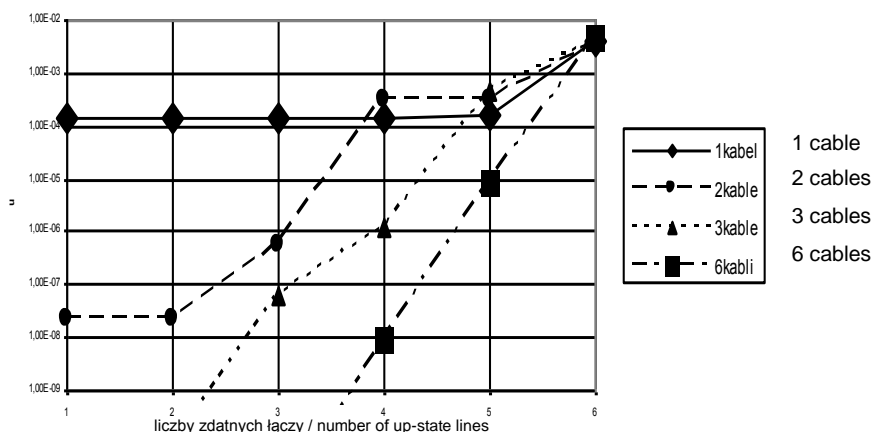
In the case of two cable lines, assuming the up state of three lines will result in slightly higher availability of the system than in the case of one cable line. This is due to the fact that to achieve the up-state condition of the system, both cable lines have to be in the up-state condition, while higher unavailability results from the doubled lengths of two cable lines with respect to one cable line. The assumption of the up-state condition of two or three lines as the up-state condition of the whole system will cause lower unavailability U than in the case of one line. This is due to the fact that the failure of one cable line causes that the two lines in the second non-failure cable are in the up state, which means the whole system is in the up state.

In the case of four cable lines with the up-state condition of 1, 2, or 3 lines, we will obtain the lowest value of unavailability U . For one up-state line the obtained value of unavailability is $U = 3,3 \cdot 10^{-13}$. If we take into account the reliability of the station device, the unavailability U of the system with the station device will not reach such low values. For telephone exchanges, the MAIDT⁵ parameter, which is approximately equal to the unavailability, should not be higher than 30 min/year [6, 17]. This corresponds to the unavailability of $1,14 \cdot 10^{-4}$. Then the unavailability of the system will not be lower than the unavailability of the exchange.

⁵ MAIDT (mean accumulated intrinsic down time) - średni sumaryczny czas niedostępności wewnętrznej

⁵ MAIDT (mean accumulated intrinsic down time)

niegotowość jako funkcja liczby zdalnych łączy / unavailability as a function of up-state lines



Rys. 5. Zależność niegotowości systemu telekomunikacyjnego z czterema urządzeniami końcowymi od założonej liczby zdalnych łączy dla kilku konfiguracji systemu (jedna linia kablowa, dwie linie kablowe, trzy linie kablowe, 6 linii kablowych)

Fig. 5. Dependency of the unavailability of a telecommunications system with four terminating devices on the assumed number of up-state lines for several system configurations (one cable line, two cable lines, three cable lines, six cable lines)

Podsumowując wydaje się, że dla oceny niezawodności sieci telekomunikacyjnej należy porównać wskaźniki niezawodności (główne niegotowość U) dla różnych wartości liczby zdalnych łączy.

6.3. Model niezawodnościowy systemu sześciu łączy

Duża złożoność wyrażeń analitycznych i ograniczenia toolboxa *symbolic* dla liczby łączy większych od czterech skłoniły autorów do zastosowania programów komputerowych do wykonywania obliczeń wskaźników niezawodnościowych.

Wykorzystano oprogramowanie *Reliability Workbench*. Zastosowano narzędzie RBD⁶ tworząc odpowiednie schematy blokowe. Schemat blokowy zawiera węzły i bloki. Węzeł, do którego dołączona jest pewna liczba wyjść bloków może mieć ustawiony parametr *Vote No*, umożliwiając obliczenia niezawodnościowe systemów zawierających struktury progowe.

Dla sześciu łączy zbudowano niezawodnościowe schematy blokowe systemów telekomunikacyjnych zawierających 6 łączy w konfiguracjach z jednym, dwoma, trzema i sześcioma kablami z parametrami liczbowymi odpowiadającymi przyjętym typowym długościom poszczególnych segmentów sieci telekomunikacyjnej (wg tabeli 2).

To sum up, it seems that in order to assess the reliability of a telecommunications network, it is necessary to compare reliability indicators (mainly unavailability U) for different values of the number of up-state lines.

6.3. Reliability model of a system with six lines

High complexity of analytical expressions and the limitations of the symbolic toolbox for more than four lines made the authors to use computer programs for the calculations of reliability indicators.

The Reliability Workbench software was used. The RBD⁶ tool served to develop proper block diagrams. A block diagram contains nodes and blocks. A node to which a certain number of block outputs is connected can have a *Vote No* parameter set. This allows to carry out reliability calculations for systems containing threshold structures.

For six lines there were reliability block diagrams built of telecommunications systems with 6 lines in configurations with one, two, three, and six cables with numerical parameters corresponding to the assumed typical lengths of the telecommunications network segments (according to Table 2).

⁶ RBD (*Reliability Block Diagram*) – niezawodnościowy schemat blokowy

⁶ RBD (*Reliability Block Diagram*)

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają wnioski sformułowane w punkcie 6.2. Do oceny niezawodności konfiguracji sieci telekomunikacyjnej należy brać pod uwagę przebieg zależności niegotowości od liczby założonych zdalnych łączy. Z rysunku 5 widać, że dla założonej ilości łączy zdalnych równej połowie wszystkich łączy, zwiększenie liczby kabli z jednego do dwóch powoduje znaczny spadek niegotowości U systemu (w analizowanym przykładzie z $1.5 \cdot 10^{-4}$ do $5.6 \cdot 10^{-7}$). Jest to zgodne z intuicyjnym pojmowaniem zagadnień niezawodności, kiedy można przypuszczać, że przy dwóch kablach uszkodzenie jednego z nich spowoduje utratę tylko połowy łączy.

7. ZAKOŃCZENIE

W artykule zaproponowano model niezawodnościowy kopalnianej sieci telekomunikacyjnej, w której wyróżniono następujące segmenty:

- kable szybowe,
- kable magistralne poza szybami,
- kable w sieci oddziałowej,
- pojedyncze pary.

Założono, że prawdopodobieństwo uszkodzenia linii zależy od jej długości. Dla każdego segmentu na podstawie badań ankietowych określono parametr przecięcia CC , który jest taką długością linii kablowej, przy której występuje jedno uszkodzenie na rok oraz średni czas odnowy.

Przedstawiono model niezawodnościowy łącza abonenckiego oraz sieci telekomunikacyjnej zawierającej wiele łączy. Dla oceny niezawodności sieci zaproponowano obliczenie zależności niegotowości U od liczby możliwych niezdatnych łączy.

The conducted calculations confirm the conclusions formulated in section 6.2. In order to assess the configuration reliability of a telecommunications network, it is necessary to consider the course of the dependency of unavailability on the number of assumed up-state lines. Figure 5 demonstrates that for the assumed number of up-state lines equal to the half of all lines, the increase in the number of cables from one to two results in a significant drop of the system unavailability U (in the analyzed example from $1.5 \cdot 10^{-4}$ to $5.6 \cdot 10^{-7}$). This is in accordance with the intuitive understanding of reliability issues when it is possible to assume that with two cables the failure of one cable will cause the loss of only half of the lines.

7. CONCLUSIONS

The article presents a reliability model of a mining telecommunications network in which the following segments were distinguished:

- shaft cables,
- bus cables outside shafts,
- cables in the department network,
- single pairs.

It was assumed that the probability of a line failure depends on its length. For each segment, on the basis of a questionnaire, the cable cut parameter CC was determined. The CC parameter is such a length of a cable line which has one failure per year and mean time to recovery.

The authors presented a reliability model of an exchange line and telecommunications network with many lines. To assess the reliability of the network, the dependency of unavailability U on the number of possible down-state lines was calculated.

Literatura

1. *Bobrowski D.*: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności. WNT. Warszawa 1985.
2. *Bucior J.*: Podstawy teorii inżynierii niezawodności. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2004.
3. *Cholda P., Jajszczyk A.*: Ocena gotowości w sieciach telekomunikacyjnych. Przegląd Telekomunikacyjny Nr 2-3/2003.
4. *Cholda P.*: The Reliability Analysis of Recovery Procedures in GMPLS-Based Optical IP networks. PhD Dissertation. AGH University of Science and Technology. Kraków 2005.
5. Terms and Definitions Related to Quality of Service and Network Performance including Dependability. ITU-T Recommendation E.800, August 1994.
6. *Jajszczyk A.*: Wstęp do telekomutacji. WNT. Warszawa 1998.
7. *Kopociński B.*: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN. Warszawa 1973.
8. Praca zbiorowa pod redakcją *J. Migdalskiego*: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”. Warszawa 1982.

References

1. *Bobrowski D.*: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności. WNT. Warszawa 1985.
2. *Bucior J.*: Podstawy teorii inżynierii niezawodności. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2004.
3. *Cholda P., Jajszczyk A.*: Ocena gotowości w sieciach telekomunikacyjnych. Przegląd Telekomunikacyjny No 2-3/2003.
4. *Cholda P.*: The Reliability Analysis of Recovery Procedures in GMPLS-Based Optical IP networks. PhD Dissertation. AGH University of Science and Technology. Kraków 2005.
5. Terms and Definitions Related to Quality of Service and Network Performance including Dependability. ITU-T Recommendation E.800, August 1994.
6. *Jajszczyk A.*: Wstęp do telekomutacji. WNT. Warszawa 1998.
7. *Kopociński B.*: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN. Warszawa 1973.
8. *J. Migdalski*, Editor: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”. Warszawa 1982.

9. PN-77/N-04005 Niezawodność w technice. Wskaźniki niezawodności. Nazwy określenia i symbole.
 10. PN-93/N-50191 Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usługi.
 11. Praca zbiorowa pod redakcją *M. Prażewskiej*: Niezawodność urządzeń elektronicznych. WKŁ. Warszawa 1987.
 12. *Rej A., Skoropacki W., Wojtas P.*: Sprawozdanie merytoryczne z realizacji Projektu Badawczego 9T12A 03116 pt. Badanie niezawodności strukturalnej kopalnianej sieci telekomunikacyjnej. Praca naukowo – badawcza Centrum EMAG. Katowice 2000.
 13. *Sharma A.*: Performance Comparision of two Dynamic Shared-Path Protection Algorithms for WDM Optical Mesh Networks. University of Pretoria 2008.
 14. *Sergiejczyk M.*: Availability of the Motorway Emergency Communications. Journal of KONBiN 2(5)2008. ISSN 1895-8281.
 15. *Szopa T.*: Niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009.
 16. *Wojtas P.*: Wpływ integracji systemów dyspozytorskich i konfiguracji sieci telekomunikacyjnych na ich niezawodność i funkcjonalność. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 2010.
 17. Digital Exchange Design Objectives – General. ITU-T Recommendation. Q.541, March 1994.
9. PN-77/N-04005 Niezawodność w technice. Wskaźniki niezawodności. Nazwy określenia i symbole.
 10. PN-93/N-50191 Słownik terminologiczny elektryki. Niezawodność; jakość usługi.
 11. *M. Prażewska*, Editor: Niezawodność urządzeń elektronicznych. WKŁ. Warszawa 1987.
 12. *Rej A., Skoropacki W., Wojtas P.*: Report from the Research Project 9T12A 03116 pt. Badanie niezawodności strukturalnej kopalnianej sieci telekomunikacyjnej. Centrum EMAG. Katowice 2000.
 13. *Sharma A.*: Performance Comparison of two Dynamic Shared-Path Protection Algorithms for WDM Optical Mesh Networks. University of Pretoria 2008.
 14. *Sergiejczyk M.*: Availability of the Motorway Emergency Communications. Journal of KONBiN 2(5)2008. ISSN 1895-8281.
 15. *Szopa T.*: Niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009.
 16. *Wojtas P.*: Wpływ integracji systemów dyspozytorskich i konfiguracji sieci telekomunikacyjnych na ich niezawodność i funkcjonalność. Doctoral thesis. Silesian University of Technology. Gliwice 2010.
 17. Digital Exchange Design Objectives – General. ITU-T Recommendation. Q.541, March 1994.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Stanisław Cierpisz

ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ ШАХТНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Целью реферата является представление результатов исследований надёжности шахтных сетей связи. В исследованиях использовано эмпирические данные, собранные в форме анкеты на участках связи польских шахт. Для кабельных линий предложено модели надёжности с действительным обновлением. Для оценки надёжности кабельных линий использовано параметр пересечения СС, вычисленный отдельно для шахтных кабелей, магистральных сетей участков и одиночных пар. Предложено модель надёжности абонентской линии. Выполнен анализ надёжности сетей связи, содержащих заданное число линий в разных конфигурациях. Результаты анализов представлены посредством цифровых примеров.