

Mirosław  
HAJDER

Mariusz  
NYCZ

Lucyna  
JASIURA



# KATASTROFY NATURALNE I TECHNOLOGICZNE

PRZYCZYNY, MODELOWANIE MATEMATYCZNE  
W WARUNKACH NIEOKREŚLONOŚCI



Mirosław Hajder,  
Mariusz Nycz, Lucyna Jasiura

# **Katastrofy naturalne i technologiczne**

Przyczyny, modelowanie matematyczne  
w warunkach nieokreśloności

Rzeszów, 2014

**Recenzja:**

Prof. zw. dr hab. Heorhii Loutskii

Prof. nadzw. dr hab. inż. Stanisław Paszczyński

**Autorzy:**

Mirosław Hajder – Katedra Elektroniki i Telekomunikacji, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania z siedzibą w Rzeszowie

Mariusz Nycz – Zakład Systemów Złożonych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Lucyna Jasiura – Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**Redakcja i korekta:**

Agnieszka Hajder

**Projekt okładki i stron tytułowych:**

Lucyna Jasiura

**Skład, łamanie i przygotowanie do druku:**

Mirosław Hajder, Piotr Hajder, Mariusz Nycz

ISBN 978-83-937166-8-5

© Copyright by Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania z siedzibą w Rzeszowie, 2014

**Wydawca:**

Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania z siedzibą w Rzeszowie

35-225 Rzeszów, ul. Sucharskiego 2

[www.wsiz.rzeszow.pl](http://www.wsiz.rzeszow.pl)

e-mail: [wsiz@wsiz.rzeszow.pl](mailto:wsiz@wsiz.rzeszow.pl), tel. 17-866-11-11

Księgarnia internetowa: [www.ksiegarnia.wsiz.pl](http://www.ksiegarnia.wsiz.pl)



**WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI I ZARZĄDZANIA**  
z siedzibą w Rzeszowie

# Spis treści

<b>WSTĘP .....</b>	<b>3</b>
<b>ROZDZIAŁ 1</b>	
<b>ZJAWISKA KATASTROFICZNE O ZASIĘGU REGIONALNYM – PROBLEMY</b>	
<b>PROGNOZOWANIA.....</b>	<b>5</b>
1.1. BADANIA W OBSZARZE ZAGROZEŃ – CELOWOŚĆ I ZAKRES .....	5
1.2. NIEJEDNORODNOŚĆ TERMINOLOGICZNA.....	9
1.3. METODY PROGNOZOWANIA ZJAWISK KATASTROFICZNYCH .....	11
1.3.1. <i>Interdyscyplinarność prognozowania .....</i>	<i>11</i>
1.3.2. <i>Klasyfikacja metody analizy i prognozowania katastrof.....</i>	<i>13</i>
1.3.3. <i>Bazowe metody analizy i prognozowania katastrof.....</i>	<i>14</i>
<b>ROZDZIAŁ 2</b>	
<b>ZAGROŻENIA TECHNOLOGICZNE PODKARPACIA.....</b>	<b>21</b>
2.1. ŚRODOWISKO NATURALNE CZŁOWIEKA .....	21
2.2. TECHNOLOGICZNE CZYNNIKI KATASTROFICZNE .....	23
2.2.1. <i>Pojęcie katastrofy technologicznej.....</i>	<i>23</i>
2.2.2. <i>Awarie na obiektach z materiałami promieniotwórczymi.....</i>	<i>23</i>
2.2.3. <i>Pożary w środowiskach łatwopalnych i wybuchowych.....</i>	<i>26</i>
2.2.4. <i>Katastrofy obiektów hydrotechnicznych .....</i>	<i>28</i>
2.2.5. <i>Katastrofy ekologiczne.....</i>	<i>31</i>
2.3. POJĘCIE RYZYKA I JEGO INTERPRETACJA .....	33
<b>ROZDZIAŁ 3</b>	
<b>OBIEKTY TECHNICZNE JAKO GRAFY.....</b>	<b>35</b>
3.1. GRAFY I ANALIZA ŻYWOTNOŚCI .....	35
3.2. ELEMENTY TEORII NIEZAWODNOŚCI .....	36
3.3. REPREZENTACJE GRAFÓW.....	41
3.3.1. <i>Podstawowe definicje teorii grafów.....</i>	<i>41</i>
3.4. GRAFOWA REPREZENTACJA STRUKTUR NIEZALEŻNYCH .....	42
<b>ROZDZIAŁ 4</b>	
<b>JEDNO- I WIELOKRYTERIALNE MINIMALNE ŚCIEŻKI W OBIEKTACH</b>	
<b>TECHNICZNYCH .....</b>	<b>49</b>
4.1. WSTĘP .....	49
4.2. JEDNOKRYTERIALNE WYSZUKIWANIE NAJKRÓTSZEJ ŚCIEŻKI W GRAFIE-MODELU.....	49
4.2.1. <i>Podstawowe definicje i charakterystyki grafu-modelu .....</i>	<i>49</i>
4.3. ALGORYTMY POSZUKIWANIA NAJKRÓTSZYCH ŚCIEŻEK .....	51
4.4. WIELOKRYTERIALNE POSZUKIWANIE ŚCIEŻEK KOMUNIKACYJNYCH .....	54
4.5. ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW KANAŁÓW KOMUNIKACYJNYCH.....	60
4.6. ANALITYCZNE BADANIA ALGORYTMÓW .....	61
<b>ROZDZIAŁ 5</b>	
<b>MINIMALIZACJA ZŁOŻONOŚCI PAMIĘCIOWEJ GRAFOWYCH MODELI</b>	
<b>OBIEKTÓW TECHNICZNYCH .....</b>	<b>63</b>

5.1.	WSTĘP .....	63
5.2.	PODSTAWOWE DEFINICJE .....	63
5.3.	DEFINICJA ZADANIA BADAWCZEGO .....	65
5.4.	PROCEDURA BUDOWY BLOKOWO-DIAGONALNEJ MACIERZY SĄSIEDZTWA .....	67
5.5.	OKREŚLENIE ROZMIARU NADGRAFU I GRAFU DE BRUIJNA .....	68
5.6.	NUMEROWANIE WIERZCHOŁKÓW GRAFU .....	70
<b>ROZDZIAŁ 6</b>		
<b>ADAPTACYJNE SYSTEMY MONITORINGU ŚRODOWISKOWEGO.....</b>		<b>79</b>
6.1.	WPROWADZENIE .....	79
6.1.1.	<i>Pojęcie monitoringu środowiska naturalnego.....</i>	<i>79</i>
6.2.	FORMALNY OPIS PROCESU MONITORINGU .....	80
6.3.	ETAPY ANALIZY DANYCH .....	83
6.4.	OPTIMALIZACJA INSTRUMENTARIUM SYSTEMU MONITORINGU .....	84
6.5.	EFEKTYWNOŚĆ FUNKCJONOWANIA REGIONALNEGO SYSTEMU MONITORINGU .....	88
<b>ROZDZIAŁ 7</b>		
<b>ARCHITEKTURA BEZPRZEWODOWYCH SYSTEMÓW MONITORINGU .....</b>		<b>91</b>
7.1.	WPROWADZENIE .....	91
7.2.	HIERARCHICZNOŚĆ SENSOROWYCH SIECI MONITORINGU .....	93
7.3.	ZADANIE PROJEKTOWANIA HIERARCHII.....	96
7.4.	TOPOLOGIE SIECI MONITORINGU .....	97
7.5.	PROBLEMY EKSPLOATACYJNE SIECI SENSOROWYCH .....	99
<b>ROZDZIAŁ 8</b>		
<b>PROGRAMOWO-SPRZĘTOWE KOMPONENTY MONITORINGU ŚRODOWISKOWEGO.....</b>		<b>103</b>
8.1.	WPROWADZENIE .....	103
8.2.	ARCHITEKTURA SYSTEMU .....	104
8.3.	ZDALNY SYSTEM POMIAROWY .....	108
8.4.	WĘZŁ AGREGUJĄCY .....	110
8.5.	CENTRALNY WĘZŁ ZARZĄDZAJĄCY .....	112
<b>ROZDZIAŁ 9</b>		
<b>PRZYKŁAD SENSOROWEGO SYSTEMU MONITORINGU ŚRODOWISKOWEGO ..</b>		<b>115</b>
9.1.	WPROWADZENIE .....	115
9.2.	CHARAKTERYSTYKA BADANEGO SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO .....	116
9.3.	PODSTAWOWE CZYNNIKI OKREŚLAJĄCE WARTOŚĆ SPŁYWU.....	119
9.4.	ROLA ZBIORNIKA W SYSTEMIE HYDROLOGICZNYM TARLAKI .....	120
9.5.	ANALIZA ODPLYWU I STANÓW TARLAKI .....	123
9.6.	ARCHITEKTURA SYSTEMU AKTYWNEGO MONITORINGU TARLAKI .....	124
9.7.	PODSTAWOWE FUNKCJE SYSTEMU MONITOROWANIA .....	126
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>129</b>

## Wstęp

Problem zachowania dla przyszłych pokoleń różnorodności środowiska naturalnego jest jednym z najważniejszych przed którymi stoi ludzka cywilizacja. Ochrona otaczającej nas przyrody, to wyjątkowo złożone, wieloplanowe zadanie. Zauważmy, że z ochroną przyrody należy pogodzić stabilny rozwój państwa, którego obowiązkiem jest troska o swoich obywateli. Nie powinno więc być tak, że któryś z celów stawianych przez państwo będzie dominował koniecznością zachowania otaczającej nas przyrody dla przyszłych pokoleń. Z drugiej jednak strony, ochrona przyrody nie może być celem samym w sobie i dominować nad wszystkim pozostałym. Wybitny polski botanik, Rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego Władysław Szafer mówił: *idea ochrony przyrody jest ideą na wskroś demokratyczną, gdyż chroni ona skarby przyrody dla całego społeczeństwa*. Jednak wspomnianej *demokratyczności* nie należy postrzegać jednostronnie. Z jednej strony, należy czynić starania, aby zachować piękno przyrody dla naszych dzieci i wnuków, z drugiej zaś trzeba zapewnić nieprzerwany wzrost poziomu życia mieszkańców Ziemi [1].

Degradacja otaczającej nas przyrody nie zawsze jest skutkiem planowych działań człowieka. Zdarza się również, że za zagrożeniem pewnych gatunków stoi sama przyroda. Bywa również tak, że człowiek nieświadomie przyczynia się do ich zagrożenia, a nawet wyginięcia. W takich sytuacjach zbawiennym może okazać się działanie człowieka, który ingerując w ekosystem może doprowadzić go do pierwotnego stanu. Aby reakcja nastąpiła w odpowiednim czasie konieczna jest obserwacja przyrody, będąca jedną z najszerzej wykorzystywanych metod poznawczych, polegającą na względnie długiej, ukierunkowanej i planowej apercpcji przedmiotów i zjawisk otaczającej nas rzeczywistości [1]. Doskonałe przykłady obserwacji środowiska naturalnego pokazane zostały jeszcze w I wieku w *Historii naturalnej* Pliniusza Starszego. W 38 tomach zawierających informacje z dziedziny astronomii, fizyki, geografii, botaniki, zoologii, medycyny wykorzystywał on obserwację jako podstawową metodę naukową.

Nie tylko ochrona otaczającego nas środowiska, ale również efektywne wykorzystanie jego zasobów, wymaga posiadania informacji o właściwościach dynamicznych obiektów tworzących je, wiedzy o zmianach będących rezultatem działań antropogenicznych. Pozwala ona przewidzieć skutki ingerencji człowieka w przebieg naturalnych procesów, jest ona również niezbędna przy prognozowaniu niebezpiecznych zjawisk przyrodniczych.

Jednym ze skutków systematycznej poprawy jakości życia ludzi jest niepokojące pogorszenie stanu otaczającego nas środowiska. W wielu miejscach kuli ziemskiej koncentracja substancji szkodliwych w powietrzu, wodzie lub glebie zagraża zdrowiu mieszkających i pracujących tam osób. Dlatego w ostatnim dziesięcioleciu wiele uwagi poświęcono przeciwdziałaniu negatywnym skutkom urbanizacji i uprzemysławiania kolejnych obszarów naszej planety. Jedną z wykorzystywanych do tego celu metod jest monitorowanie stanu środowiska, pozwalające śledzić

szkodliwe zjawiska zachodzące w naszym otoczeniu i w odpowiednim czasie podejmować stosowne działania. Monitoring może być prowadzony na trzech różnych poziomach: *wpływu* (badanie silnych oddziaływań w skali lokalnej); *regionalnym* (analiza przemieszczania i transformacji zanieczyszczeń oraz ich wpływu na ekonomikę regionu); *tła* (badania na terenie rezerwatów biosfery, wyłączonych z jakiegokolwiek działalności gospodarczej) [2], [3].

Zazwyczaj, terminem *monitoring środowiska* określamy system obserwacji i kontroli stanu otoczenia, wspomagający racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych, ochronę przyrody i zapewnienie stabilnego funkcjonowania różnych systemów gospodarczych. Zgodnie z inną, powszechnie wykorzystywaną definicją, monitoring to system permanentnej obserwacji składowych środowiska i biosfery jako całości poprzez pomiar ich wybranych charakterystyk.

Analizą zagrożeń zajmuje się fundamentalna dyscyplina naukowa, nazywana *ogólną teorią bezpieczeństwa* (OTB) [4], [5]. Pierwszoplanowym obiektem badań OTB jest określenie fundamentalnych prawidłowości przejścia naturalnych systemów przyrodniczych, obiektów technicznych, sfery biologicznej i struktur społeczno-gospodarczych ze stanu normalnego funkcjonowania, do stanu awaryjnego lub katastroficznego, a także zasad ich wzajemnego współdziałania w procesie wspomnianej zmiany stanu. Ponadto, OTB zajmuje się budową naukowych podstaw diagnozowania, monitoringu i prognozowania zagrożeń, a także metodami przeciwdziałania katastrofom i likwidacji ich skutków. W OTB, szczególne znaczenie zajmuje określenie sposobów szacowania i pomiarów skali zagrożeń oraz poziomu ochrony obiektów i obszarów. Na tej podstawie, definiowane są ilościowe i jakościowe parametry podejmowanych decyzji, zawartość dokumentów normatywnych oraz konkluzje komisji badających skutki awarii i katastrof. W OTB, za najbardziej uogólnione kryteria oceny, przyjęto uważać poziom ryzyka dla zdrowia i działalności człowieka, a także jakość i zagrożenia jego życia.

Niniejsza monografia prezentuje wybrane dokonania autorów w obszarze bezpieczeństwa środowiskowego, ze szczególnym akcentem na teoretyczne i praktyczne problemy budowy bezprzewodowych sensorowych systemów monitoringu. Zaprezentowane wyniki mogą być wykorzystane także przy budowie systemów informacyjnych charakteryzujących się odpornością na zdarzenia losowe o cechach katastroficznym.

Autorzy



## ROZDZIAŁ 1

### Zjawiska katastroficzne o zasięgu regionalnym – problemy prognozowania

#### 1.1. Badania w obszarze zagrożeń – celowość i zakres

*Panta rhei* – to stwierdzenie Heraklita z Efezu doskonale ilustruje funkcjonowanie współczesnego świata. Chociaż odnosimy go głównie do sfery społecznej to w ciągłym ruchu znajduje się cała otaczająca nas rzeczywistość. Coraz częściej pojawiające się katastrofy są, przede wszystkim, rezultatem permanentnych zmian środowiskowych, zachodzących również na skutek działalności człowieka. W języku potocznym, katastrofa, to nagła zmiana charakterystyk otaczającego nas świata [6], [7]. Może mieć ona charakter twórczy, pozytywnie przekształcający otoczenie lub destrukcyjny, negatywnie wpływający na środowisko i społeczeństwo. Katastrofy, to naturalne zjawiska rozwoju świata i ich pojawianie jest nieuchronne. Jeżeli nie będziemy przygotowani na nie, mogą one skutkować poważnymi konsekwencjami dla człowieka i jego otoczenia [8], [4], [9].

Do najważniejszych przyczyn pojawiania się katastrof, zaliczamy obecnie [6], [4], [10], [11], [12], [13]:

1. Zwiększoną wrażliwość na czynniki zewnętrzne środowiskowej i technologicznej sfery życia, wynikającą m. in. z naruszenia naturalnej równowagi w przyrodzie, poprzez masowe wykorzystanie zdobyczy nauki i techniki, obcych naturalnemu środowisku;
2. Utrudniające naturalną regenerację biosfery: antropogeniczne przekształcenie środowiska naturalnego, poszerzenie technosfery, a także masową eksploatację dotychczas dziewiczych obszarów Ziemi;
3. Wysoką wrażliwość społecznej sfery życia na klęski żywiołowe i technologiczne, przejawiającą się potęgowaniem negatywnych skutków katastrof.

Chociaż na Podkarpaciu, nie występują zjawiska niosące najpoważniejsze zagrożenia, takie jak: trzęsienia ziemi, zjawiska wulkaniczne, tornada czy tsunami, prawdopodobieństwo pojawienia się innych rodzajów katastrof naturalnych, technologicznych czy humanitarnych jest ciągle wysokie. Najistotniejsze zagrożenia województwa, to w głównej mierze konsekwencje: niestabilności geopolitycznej regionu, obecności zakładów przemysłowych wykorzystujących niebezpieczne technologie, zakrojonej na szeroką skalę produkcji militarnej, lokalizacji jednostek wojskowych biorących udział w walce z terroryzmem oraz coraz częstszych, gwałtownych zjawisk pogodowych. Z tego powodu, bezzwłocznie należy podjąć wielostronne działania, mające na celu prognozowanie wystąpienia oraz przeciwdziałanie pojawianiu się katastrof. W pierwszej kolejności, prace te powinny obejmować

badania naukowe w danych obszarach. Ich celem nadrzędnym powinna być maksymalizacja bezpieczeństwa ludzi i mienia, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów likwidacji następstw nieuchronnych katastrof [11], [12], [14], [15], [16].

Badania dotyczące bezpieczeństwa w obszarach naturalnym i technologicznym obejmują zazwyczaj trzy płaszczyzny: teoretyczną, aplikacyjną oraz zarządczą. Prace realizowane w płaszczyźnie *teoretycznej* mają na celu: pozyskanie nowej wiedzy, pozwalającej zrozumieć zachodzące zjawiska oraz przygotowanie zaleceń, określających metody przeciwdziałania zagrożeniom. Badania *aplikacyjne* zajmują się przygotowaniem wytycznych projektowania i budowy bezpiecznych obiektów technicznych, oceną poziomu stabilności istniejących budowli, sposobami przedłużenia okresu ich bezpiecznej eksploatacji lub poprawą odporności na występujące zagrożenia. Ponadto, w ich ramach przygotowuje się metody prognozowania zmian stanu systemów naturalnych i technicznych oraz szybkiego podejmowania działań zmierzających do minimalizacji szkód wywołanych przez klęski żywiołowe. Prace w płaszczyźnie *zarządzania*, mają na celu opracowanie i wdrożenie procedur reagowania na zagrożenie na każdym z poziomów władzy państwowej i samorządowej.

Na powyższych płaszczyznach powinny być prowadzone zarówno badania podstawowe, jak i stosowane. Głównymi zadaniami badań podstawowych są: określenie najważniejszych zasad bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych, klasyfikacja katastrof oraz obiektów technicznych i ich podatności na zagrożenia, a także poszukiwanie sposobów przeciwdziałania katastrofom i minimalizacji ich negatywnych skutków. Badania te powinny uwzględniać wszelkie uwarunkowania rozwoju społeczno-gospodarczego. Zakres prac powinien obejmować analizę prawidłowości regulujących pojawianie i przebieg katastrof charakteryzujących się okresowością występowania, a także poziom strat ponoszonych przez ludność, przedsiębiorstwa, jak również przez środowisko naturalne. Na ich podstawie, przygotowuje się scenariusze przebiegu katastrof, wybiera i wdraża efektywne metody ochrony. Rozwiązując powyższe zadania, niezbędnym jest prowadzenie badań systemowych w obszarach: geologii, hydrologii, mechaniki, fizyki i in., bezpośrednio odnoszących się do badanych katastrof. Prace te powinny opierać się na zastosowaniu modeli wielowymiarowych i modelowania imitacyjnego, co implikuje ich czaso- i kosztochłonność. Wysoką złożonością charakteryzują się także badania nad minimalizacją skutków katastrof. Prace prowadzone w obszarze badań podstawowych nie mogą wykluczyć badań eksperymentalnych. Zazwyczaj są one podstawą wyznaczenia prawidłowości wiążących symptomy katastrofy z ich pojawianiem. Nierzadko, badania te przynoszą zaskakujące wyniki. Przykładowo, trzęsienia ziemi zazwyczaj poprzedzają zmiany struktury przestrzennej jonosfery.

Najbardziej oczekiwanym wynikiem badań podstawowych są nowe, skuteczniejsze metody prognozowania zagrożeń. Mogą być nimi również sposoby minimalizacji skutków katastrof, a także atlasy zagrożeń naturalnych i technologicznych, przygotowywane dla obszarów z największą koncentracją niekorzystnych zjawisk.

Podobnie jak w przypadku innych dyscyplin naukowych, *badania stosowane* prowadzone są zazwyczaj w oparciu o wyniki badań podstawowych. Prace te obejmują dostosowanie przygotowanych wcześniej teorii do ich wdrożenia na bazie dostępnych rozwiązań technicznych. Badania stosowane, szeroko wykorzystują analizę systemową, pozwalającą opracować i wdrożyć zestaw ogólnych zasad, którymi należy się kierować, w celu zagwarantowania skuteczności i bezpieczeństwa ochronnych systemów technicznych. W szczególności, budując je, należy opierać się na poniższych, podstawowych zasadach:

1. *Zasadie wielopoziomowości systemu ochrony.* Systemy ochronne powinny mieć strukturę warstwową, pozwalającą kompensować skutki potencjalnych uszkodzeń własnych komponentów. Należy zapewnić automatyczne ograniczenie funkcjonalnych i decyzyjnych właściwości systemu w przypadku jego uszkodzenia. Ograniczenia te limitują zakres automatycznych działań, w stosunku do normalnej pracy i pojawiają się natychmiast po wykryciu uszkodzenia;
2. *Zasada niezależności i różnorodności.* Zakłada ona możliwość wystąpienia uszkodzenia lub błędów w systemie ochronnym. Oznacza to, że niesprawność wybranych elementów, nie ogranicza funkcjonalności systemu jako całości. W praktyce, implementacja danej zasady sprowadza się do nadmiarowania czasowego, sprzętowego i funkcjonalnego systemów ochronnych;
3. *Zasada autodiagnostyki.* Zgodnie z nią, najbardziej prawdopodobne niesprawności systemu, będące skutkiem zagrożenia, są diagnozowane autonomicznie przez sam system, znacznie wcześniej niż wykrywane jest samo zagrożenie.

Choć badania nad katastrofami prowadzone są od kilkadziesiąt lat [17], [18], [19], [20], to właśnie ostatnie lata, z wielu różnych powodów, zmieniły naukowe podejście do badania tych zjawisk. *Po pierwsze*, z początkiem XXI wieku pojawiło się wiele nowych analitycznych i empirycznych narzędzi badawczych, pozwalających poprawić skuteczność prognozowania wystąpienia i przebiegu zjawisk katastroficznych. W szczególności, powszechnie dostępne stały się bezprzewodowe sieci sensorowe WSN (ang. *Wireless Sensor Network*), pozwalające z dużą precyzją, w czasie rzeczywistym, śledzić zmiany wybranych parametrów środowiska i dowolnych obiektów technicznych [21], [22]. Na podstawie pozyskanych z nich informacji, są opracowywane i eksploatowane, coraz to doskonalsze modele matematyczne zachodzących zjawisk. *Po drugie*, pojawiły się nowe typy zagrożeń, występujące dotąd w znacznie mniejszej skali i niebędące przedmiotem zainteresowania naukowców i polityków [13], [5]. Przykładem są tutaj katastrofy humanitarne, które jeszcze kilka dziesięcioleci temu były najczęściej przemilczane. Zazwyczaj, są one skutkiem niestabilności społeczno-politycznej, ale ich przyczyną mogą być także katastrofy naturalne i technologiczne.

Szczególny rodzaj zagrożeń niesie ze sobą rozwój nauki i techniki. Początkowo, miał on charakter twórczy, ukierunkowany na poprawę poziomu życia. Z czasem,

wraz z wyczerpywaniem się bogactw naturalnych, wzrostem konkurencji i globalizacją gospodarki światowej, dla dużych korporacji stał się on podstawowym narzędziem pogoni za zyskiem. *Po trzecie*, informatyka dostarczyła nowych, wydajniejszych i bardziej niezawodnych środków przetwarzania, pozwalających jednocześnie analizować wszystkie zagrożenia występujące na danym obszarze. Dzięki temu, opracowywane prognozy są kompleksowe, bardziej precyzyjne i dostarczane z większym wyprzedzeniem [5], [23], [24], [25].

Potrzeba kompleksowości badań w obszarze katastrof, niesie ze sobą szereg nowych, nieznanych wcześniej problemów. Jednym z nich jest interdyscyplinarność, wymuszająca prowadzenie badań z wykorzystaniem wielu, nierzadko bardzo odległych od siebie dyscyplin naukowych [26]. Niektóre z nich, korzystają z terminologii i metodologii przygotowanych specjalnie do badania konkretnego zjawiska, inne zaś wykorzystują uniwersalne techniki, charakterystyczne dla danej dziedziny [27], [28]. Jednak w obu przypadkach, z uwagi na istotne różnice terminologiczne i metodologiczne, ścisłe współdziałanie ze sobą grupy dyscyplin jest bardzo utrudnione. W rezultacie, interdyscyplinarność badań jest tylko pozorna, co wyklucza możliwość pojawienia się pożądanego efektu synergii.

Obecnie, walka z katastrofami, najczęściej sprowadza się do opracowania procedur likwidacji ich skutków. Podejście takie jest nieefektywne i w dłuższej perspektywie przyniesie poważne negatywne konsekwencje. Każda kolejna katastrofa, powoduje niepowetowane straty w środowisku i społeczeństwie, w wielu przypadkach niemożliwe już do nadrobienia. Dlatego, aktualnie należy skoncentrować się na działaniach prewencyjnych, minimalizujących prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń. Ograniczenie się do usuwania skutków katastrof wynika z:

1. *Złożoności zadania prognostycznego.* Już samo przewidywanie pojawienia się zagrożenia jest zadaniem złożonym, wymagającym uwzględnienia ogromnej liczby różnorodnych czynników. Modelowanie skuteczności działań prewencyjnych jest procesem jeszcze bardziej skomplikowanym. Ponadto, rezultaty większości takich badań, nie są wdrażane, co nie sprzyja zainteresowaniu ich finansowaniem;
2. *Niedoskonałości w podziale obowiązków.* Dbałość o stan obiektów ochronnych spoczywa na znacznej ilości organizacji, zarówno na powołanych do tego służbach państwowych, jak również samorządach oraz prywatnych i publicznych podmiotach gospodarczych, a także osobach fizycznych. Służby mają zazwyczaj ograniczony wpływ na właścicieli lub zarządców obiektów, którzy nie troszczą się o stan techniczny infrastruktury ochronnej.
3. *Niedoskonałej struktury organizacyjnej.* Rola państwa w monitoringu środowiska i stanu infrastruktury ochronnej na poziomie regionalnym jest niewystarczająca. W mikroskali, monitoring jest realizowany przez znaczną liczbę, niepowiązanych ze sobą jednostek, z których każda, zajmuje się ograniczonym obszarem i jakościowo pomiarem parametrów. Ponadto, podmioty te nie mają obowiązku prognozowania katastrof;

4. *Przewlekłości procesów prawno-politycznych.* Przyczyny i skutki wielu spośród zagrożeń mają charakter ponadnarodowy. Przeciwdziałanie im wymaga uzgadniania i ratyfikowania umów międzynarodowych, co jak pokazuje doświadczenie, jest procesem wyjątkowo długotrwałym i kosztownym. Niestety, przeciąganie się wielostronnych uzgodnień, często przyczynia się do zwiększania strat wynikających z braku działań zapobiegawczych.

Pomimo powyższych ograniczeń, należy oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości bazujące na modelowaniu metody prewencyjne będą się intensywnie rozwijać, a ich rola zostanie zauważalnie poszerzona.

## 1.2. Niejednorodność terminologiczna

Ogólna teoria bezpieczeństwa opiera się na terminologii włączającej takie pojęcia jak: bezpieczeństwo, zagrożenie, ochrona, prawdopodobieństwo, ryzyko, awaria, katastrofa, sytuacja nadzwyczajna, środowisko naturalne, czynniki rażenia, niebezpieczny wpływ, reakcja systemu i in. Niestety, analiza materiałów źródłowych z dziedziny modelowania obiektów i katastrof pokazuje, że w obszarach tych panuje nieład terminologiczny i metodologiczny, wynikający z niedostatecznej systematyzacji obu wskazanych obszarów. W przestrzeni terminologicznej, wykorzystywane są wyłącznie płaskie klasyfikacje rodzajowe, bazujące na typie obiektu bądź zjawiska. Pomimo zbieżności, a w wielu przypadkach identyczności opisu matematycznego, wykorzystanie przygotowanych metodologii jest zawężone wyłącznie do badania zachowania konkretnego typu obiektu lub zjawiska. W rezultacie, prowadzone badania nie są interdyscyplinarne, co skutkuje brakiem efektu synergii, a wyniki prac mogą być wykorzystywane wyłącznie w jednej dyscyplinie naukowej. Powyższe prawidłowości, obserwuje się w takich obszarach jak: mechanika i elektrotechnika, hydrologia i geologia, chemia i biologia, zarządzanie kryzysowe, polityka, psychologia i socjologia. Celowym jest zatem podjęcie prac nad ujednoczeniem aparatu pojęciowego, służącego do opisu obiektów i zachodzących z ich udziałem zdarzeń.

W przeciągu ostatniego dziesięciolecia, w obszarze badań nad zagrożeniami, pojawiła się nowa tendencja. Z uwagi na masowe zastosowanie personalnego sprzętu komputerowego o niskiej cenie i relatywnie niewielkiej mocy obliczeniowej, obserwuje się odchodzenie od wykorzystania uogólnionych modeli i metodyk badawczych, na rzecz uszczegółowionych, adresowanych do bardzo wąskiego obszaru tematycznego. Dzięki takiemu podejściu, tworzenie dedykowanych aplikacji informatycznych znacznie się upraszcza, zmniejszają się również ich złożoności: pamięciowa i czasowa, przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności w skali makro. Kosztem takiego podejścia jest powielanie przez różne zespoły prac nad budową i wdrożeniem, nierzadko bardzo złożonych aplikacji [27]. W opisywanym przypadku, badania dotyczą wąskiego obszaru tematycznego i problem niejednorodności terminologiczno-metodologicznej odgrywa drugoplanowe znaczenie. Jednak wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów PC, opisywana tendencja będzie

stopniowo zanikać, a wspomniany problem niejednorodności powróci ze zwielokrotnioną siłą.

Ujednoczenia terminologicznego, w pierwszej kolejności, należy poszukiwać w obszarze matematycznej teorii katastrof (MTK) R. Thom'a i Ch. Zeeman'a [8], [29], [30]. MTK zajmuje się analizą przestrzenno-czasowych modeli i praw rozwoju katastrof, zachodzących w systemach i strukturach złożonych, bez szczegółowego rozróżnienia rodzajów obiektów i zjawisk. Niestety, nawet w ramach samej MTK brakuje jednolitości terminologicznej. Zgodnie z definicją podawaną w pracach V. I. Arnolda katastrofa to gwałtowna jakościowa zmiana obiektu, w wyniku jednostajnej ilościowej zmiany jego parametrów. Z kolei definicja, zgodna z pracami H. Poincare, określa katastrofę, jako utratę stabilności harmonicznego ruchu systemu i jego skokowe przejście do nowego stanu równowagi, z aktualnymi parametrami tegoż ruchu. Z tego i kilku innych powodów, należy przyjąć, że bezpośrednie wykorzystanie nazewnictwa, pochodzącego z matematycznej teorii katastrof nie jest możliwe, a MTK powinna posłużyć wyłącznie, jako punkt wyjścia do budowy nowego, uogólnionego aparatu pojęciowego.

O ile wykorzystanie matematycznej teorii katastrof do ujednoczenia aparatu pojęciowego interdyscyplinarnych badań nad zagrożeniami nie budzi wątpliwości, to jej zastosowanie do ich prognozowania jest bardzo problematyczne. MTK pozwala skutecznie analizować wyłącznie zachowania systemów technicznych, a wykorzystanie jej w biologii, psychologii, socjologii bądź do analizy rynku kapitałowego, skutkuje jedynie przygotowaniem mało precyzyjnych, heurystycznych oszacowań zachodzących zmian. W odniesieniu do obiektów technicznych, MTK rozwiązuje tylko zadanie określenia warunków powstania katastrofy, nie pozwalając nawet oszacować jej lokalizacji i momentu wystąpienia [30], [31], [29], [32], [33], [34], [35]. Dlatego, należy przyjąć, że precyzyjne prognozowanie katastrof, trzeba oprzeć na wykorzystaniu specjalistycznych metod i metodyk powstałych m. in. na bazie MTK.

Niejednoznaczność i niejednorodność terminologiczna dotyczą również strony prawnej opisu katastrof. Przykładem może tu posłużyć określenie siły wyższej. W komentarzach do prawa cywilnego, niejednokrotnie zwracano uwagę na dyskusyjność i jednoznaczność legalnego określenia *siła wyższa*. Sygnalizowany problem jest istotny, ponieważ określenie to, pojawia się w wielu umowach cywilnoprawnych, w klauzulach zwalniających strony z odpowiedzialności za zaistniałe szkody. Ekspertki skłaniają się do interpretacji, zgodnie z którą cechami kwalifikującymi siły wyższej są nadzwyczajność i nieuniknioność w danych warunkach. Jednocześnie, nadzwyczajności przypisują wyjątkowość i dużą siłę działania, z kolei nieuniknioność wiązana jest z niemożliwością zapobieżenia szkodliwemu działaniu siły wyższej, za pomocą środków dostępnych danemu podmiotowi.

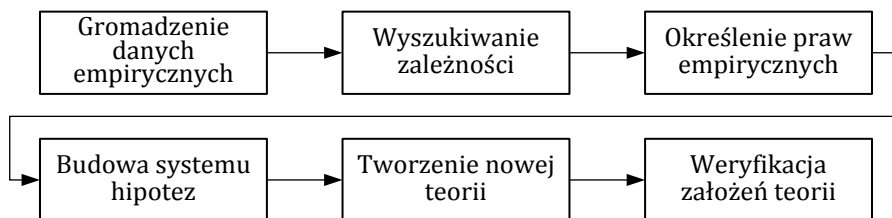
Podobne wątpliwości prawne, pojawiają się przy próbie jednoznacznej interpretacji terminu *sytuacja nadzwyczajna*. W szczególności, błędną jest interpretacja

uznająca każdą sytuację nadzwyczajną jako siłę wyższą. Część spośród znanych definicji, za sytuację taką uznaje stan zagrażający suwerenności państwa, podstawom ładu konstytucyjnego, bezpieczeństwu obywateli, normalnej działalności instytucji państwowych oraz samorządowych i wymagający podjęcia przez społeczeństwo i państwo energicznych, ekstremalnych i nadzwyczajnych działań prawno-organizacyjnych mających na celu jego likwidację.

### 1.3. Metody prognozowania zjawisk katastroficznych

#### 1.3.1. Interdyscyplinarność prognozowania

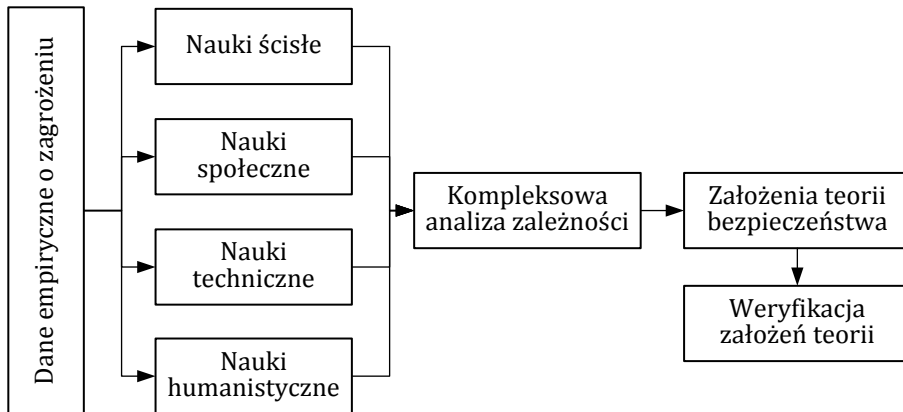
Ogólna teoria bezpieczeństwa, włączająca analizę zjawisk katastroficznych, w ostatnim dziesięcioleciu istotnie zmieniła swoje podejście do prowadzonych badań. W miejsce analizy danych empirycznych i tworzenia selektywnych modeli matematycznych, przeszła ona do kompleksowego badania wzajemnie powiązanych zjawisk i ich skutków. Klasyczne podejście do budowy OTB zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Klasyczne podejście do budowy ogólnej teorii bezpieczeństwa

Zgodnie z nim, tworzenie teorii, rozpoczyna się od gromadzenia danych empirycznych opisujących wybrane zjawisko, pochodzących z wieloletnich obserwacji lub pomiarów. Następnie, z wykorzystaniem analizy statystycznej bądź innych metod formalnych, określone są współzależności pomiędzy zebranymi danymi i zachodzącymi zjawiskami. Na ich podstawie, definiowane są prawa empiryczne opisujące badane zjawisko, wykorzystywane dalej do budowy systemu hipotez. Na ich bazie tworzona jest nowa teoria, podlegająca późniejszej weryfikacji. Ponieważ powstaje ona w wyniku wybiórczej analizy, zarówno przebiegu zjawisk, jak i mechanizmów ich powstawania, nie uwzględnia ona całości zmian zachodzących w środowisku naturalnym, technicznym i społeczno-gospodarczym.

Zagrożenia analizowane przez OTB są zazwyczaj wzajemnie powiązane. Oznacza to, że skutkiem wystąpienia jednego zjawiska jest nieuchronne pojawienie innego, nierzadko o diametralnie różnej przyrodzie. Przykładowo, wielkoskalowe katastrofy naturalne obligatoryjnie implikują katastrofy humanitarne. W klasycznym podejściu, oba rodzaje katastrof są prognozowane i analizowane niezależnie. Istotą podejścia interdyscyplinarnego jest jednoczesne badanie grupy różnych zagrożeń z wykorzystaniem wielu dyscyplin naukowych. Koncepcję budowy ogólnej teorii bezpieczeństwa w oparciu o interdyscyplinarną analizę zachodzących zjawisk, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Interdyscyplinarne podejście do tworzenia ogólnej teorii bezpieczeństwa

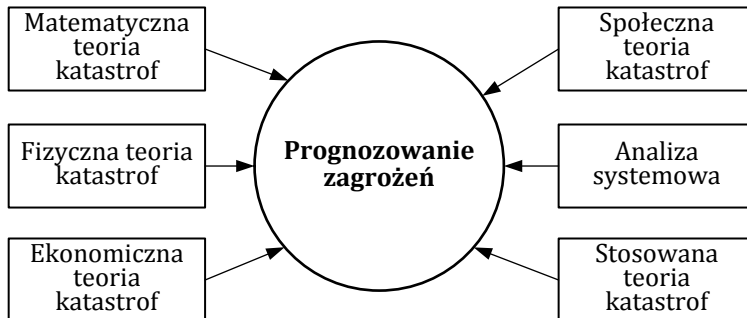
Podobnie jak w poprzednim przypadku, procedurę budowy OTB, rozpoczyna gromadzenie danych empirycznych charakteryzujących zagrożenie, które następnie są analizowane za pomocą zestawu dyscyplin naukowych, opisujących zjawisko. Następnie, wykonywana jest kompleksowa analiza zależności, określająca korelacje pomiędzy poszczególnymi komponentami, na bazie której tworzone są podstawowe założenia OTB. W najprostszym przypadku, interdyscyplinarność pozwala analizować różnorodne skutki (środowiskowe, społeczne lub ekonomiczne) konkretnego zagrożenia. Możliwe jest również jednoczesne badanie wielu zagrożeń, co wymaga jednak znaczących mocy obliczeniowych, niezbędnych do uruchomienia grupy wzajemnie powiązanych modeli matematycznych. Podejście interdyscyplinarne można również wykorzystywać do opracowania prognoz pojawienia, przebiegu, a także przeciwdziałania zjawiskom katastroficznym.

*Matematyczna teoria katastrof* jest algorytmiczną podstawą procedur prognozytycznych. Z uwagi na zbytnią ogólność, wykorzystanie klasycznej MTK, nie jest zalecane. Wykorzystywana teoria, powinna analitycznie opisywać zjawiska zachodzące w trakcie katastrof, zapewniając jednocześnie możliwość implementacji modelu w postaci programu komputerowego. *Fizyczna teoria katastrof* określa przestrzenno-czasowe charakterystyki ich przebiegu. Teoria ta, powinna szczegółowo opisywać zjawiska zachodzące, zarówno w trakcie katastrofy, jak i przed oraz po jej zaistnieniu. *Ekonomiczna teoria katastrof* zajmuje się analizą wzajemnego wpływu ekonomii i zagrożeń. Powinna ona uwzględniać oddziaływanie katastrof na ekonomikę regionu, a także wpływ tej ostatniej na pojawianie się zagrożeń.

*Społeczna teoria katastrof* analizuje uwarunkowania powstawania i przebiegu katastrof, wynikające z przebywania ludzi na obszarze objętym zdarzeniem. Teoria ta, analizuje czynniki społeczne, przyczyniające się do powstawania zagrożeń, a także pogłębiające negatywne skutki katastrof. *Analiza systemowa* bada właściwości katastrof, w szczególności określa ujednoczone fizyczne i społeczne prawidłowości ich powstawania i przebiegu, wykorzystywane w procesie prognozowania.



*Stosowana teoria katastrof* (STK) jest elementem wiążącym wszystkie dyscypliny tworzące procedurę prognozowania. W ramach STK, opracowywane są interdyscyplinarne metodyczne, algorytmiczne i programowe podstawy prognozowania, zarówno w skali globalnej, jak również regionalnej. Metodologiczne komponenty takiego prognozowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Grupa teorii wykorzystywanych w badaniach nad prognozowaniem zjawisk katastroficznych

Interdyscyplinarność procedur prognozowania to obecnie konieczność. Tylko wtedy, możliwe jest jednoczesne uwzględnienie zbioru naturalnych, antropogenicznych, medycznych i socjalnych procesów, uprawdopodobniających pojawienie się katastrof. Procesy te mogą przebiegać równolegle lub kaskadowo, może wiązać je synergia, mogą być one również niezależne. Zauważmy, że powiązanie człowieka z jego otoczeniem ma nieskończenie złożony charakter i w wielu przypadkach nie jest możliwy jawny tego opis. Z drugiej jednak strony, wzajemne relacje człowiek-środowisko, muszą być obowiązkowo uwzględnione w procesie prognozowania. Dodatkowo, interdyscyplinarność sprzyja odejściu od metod probabilistycznych i zastąpieniu ich metodami numerycznymi, zapewniającymi większą precyzję i wiarygodność prognozowania. Przyszłość prognozowania katastrof należy wiązać z metodami hybrydowymi, w których techniki probabilistyczne wspomagane będą za pomocą podejścia numerycznego, doskonalącego dokładność wyników w ujęciu ilościowym i czasowym.

### 1.3.2. Klasyfikacja metody analizy i prognozowania katastrof

Liczba różnorodnych metod wykorzystywanych obecnie do analizy i prognozowania występowania oraz przebiegu zjawisk katastroficznych, zbliża się do 200. Zazwyczaj, metody te dzielone są na trzy grupy: metody heurystyczne, ekstrapolacyjne oraz modelowanie matematyczne. Za najbardziej przyszłościowe powszechnie uważa się metody modelowania matematycznego, które dzieli się na: eksperymentalne metody modelowania procesów naturalnych i technologicznych; numeryczne metody modelowania oraz metody jednoczesnego wykorzystania zweryfikowanych modeli i obliczeń inżynierskich. O ile wcześniej analizie poddawane były pojedyncze zjawiska o ograniczonym zasięgu, to obecnie badania obejmują również wielostronne zagrożenia, w których powiązanie pomiędzy ich składnikami nie

występuje lub jest nieistotne. Dlatego, do badania grupy zagrożeń coraz częściej wykorzystuje się metody hybrydowe, łączące w sobie narzędzia każdej z klasycznych metod prognostycznych.

Prognozowanie może mieć charakter krótko- lub długoterminowy. Prognozowanie *krótkoterminowe* pozwala określić spektrum prawdopodobieństw pojawienia się na wskazanym obszarze, różnych sytuacji nadzwyczajnych o charakterze naturalnym lub technologicznym. Prognozowanie *długoterminowe* ma na celu kompleksową ocenę ryzyka wystąpienia zagrożeń z uwzględnieniem prawdopodobieństw ich pojawienia i towarzyszących temu strat, do czego wykorzystywane są metodologie analizy i zarządzania ryzykiem. Uzyskiwane w ten sposób wyniki, wykorzystuje się m. in. jako: dane wejściowe do opracowania i weryfikacji planów zapobiegania i likwidacji skutków katastrof, przygotowania map zagrożeń obszarów i obiektów, a także do ukierunkowania działań organów władzy w zakresie reagowania na zagrożenia.

### 1.3.3. Bazowe metody analizy i prognozowania katastrof

W chwili obecnej, przy badaniu katastrof, najszerze zastosowanie znalazły *metody statystyczne*, zakładające utworzenie zbioru danych statystycznych, jego systematyzację oraz późniejsze przetworzenie za pomocą stosownych metodyk. Choć metody te są stosowane bardzo szeroko, ich znaczenia nie należy przeceniać. Jednym z podstawowych błędów popełnianych w procesie ich wykorzystania jest ograniczenie się do matematycznej analizy zgromadzonych danych z pełnym pominięciem fizycznego mechanizmu zjawiska. Rola analizy statystycznej powinna ograniczać się do oceny poprawności wykrytej w procesie analizy istoty zjawiska bądź procesu. W prognozowaniu katastrof, szeroko wykorzystywana jest odmiana metod statystycznych, tzw. *analiza częstotliwościowa*. W klasycznym zastosowaniu, stworzona przez kryptologów metoda, porównuje częstości występowania znaków alfabetu w łamanym tekście tajnym z częstością ich pojawiania się w danym języku, dzięki czemu symbolom kryptogramu przypisywane są znaki tekstu jawnego.

Metody statystyczne są najszerzej wykorzystywane w meteorologii i hydrologii, gdzie stosuje się je do analizy niebezpiecznych zjawisk pogodowych. Opierają się na analizie gromadzonych od wielu stuleci danych o zjawiskach pogodowych. Mają one jednak kilka istotnych wad, z których najważniejszą jest konieczność znajomości funkcjonałów rozkładu prawdopodobieństwa zjawisk katastroficznych, od którego dokładności zależy precyzja prognozowania. Niestety, w wielu przypadkach czasookres obserwacji zjawiska jest zbyt krótki, aby zdefiniowany na jego bazie rozkład był precyzyjny. Ponadto, statystyka, podobnie jak każda inna metoda matematyczna posiada sztywne zakresy, w których powinny znajdować się formalno-matematyczne rozkłady opisujące badane zjawiska. Niestety, sposoby określania prawdopodobieństw w tych obszarach są nieprecyzyjne lub w ogóle nieznane.

Szerokie rozpowszechnienie metod statystyczno-częstotliwościowych doprowadziło do odkrycia wielu prawidłowości powtarzających się w przyrodzie i społeczeństwie, w takich obszarach jak: medycyna, socjologia, meteorologia, sejsmologia czy wulkanologia [36], [37]. Zajmująca się tym problemem *teoria cykli* opisuje zasady ich zmian oraz cechy szczególne korelacji pomiędzy cyklami. W szczególności wyróżniono następujące prawidłowości:

1. Cykle falowe lub spiralne są wszechobecne we wszystkich powtarzających się zjawiskach, w których występują fazy wznoszenia i opadania bądź przyspieszania i spowalniania zachodzących zmian;
2. Cykle są wzajemnie powiązane, krzywa dynamiki dowolnego cyklu jest wypadkową wpływu innych cykli, nawet tych z niepowiązanych obszarów;
3. Wpływ cykli zewnętrznych może wzmacniać lub osłabiać przebieg danego cyklu, naruszając w ten sposób jego naturalny przebieg.

Chociaż w szeregu dyscyplin, ponad wszelką wątpliwość, udowodniono występowanie cykli, ich wykorzystanie do prognozowania katastrof napotyka na szereg istotnych przeszkód. Nie zawsze, cykle posiadają czytelne powiązanie z określonym czynnikiem bądź ich kombinacją, wywołujące pojawienie się katastrofy. W takim przypadku, jakiegokolwiek prognozowanie jest utrudnione, a nawet niemożliwe. Dla występowania katastrof, długości cykli nie są precyzyjne, a dla zjawisk długoterminowych, rozbieżności mogą sięgać miesięcy, a nawet lat. W ostatnich latach, z uwagi na wyjątkowo intensywną eksploatację środowiska naturalnego, zaobserwowano naruszenie cykliczności szeregu zjawisk o charakterze katastroficznym. Analiza powyższych prawidłowości, pokazuje, że zastosowanie analizy częstotliwościowej i teorii cykli do prognozowania jest problematyczne [29], [38].

Istnieje szereg zjawisk, których opis matematyczny jest utrudniony lub wręcz niemożliwy. Ich przykładem są wahania cen akcji na giełdzie, będące skutkiem zmiany sytuacji społeczno-politycznej, czy pojawianie się w litosferze, nieobecnych wcześniej związków chemicznych, poprzedzające trzęsienie ziemi. Do prognozowania takich zjawisk można zastosować *metodę analogii*, polegającą na wyszukiwaniu podobieństw procesów poprzedzających katastrofy i porównaniu ich zmian w różnych okresach czasu [39], [40]. W metodzie tej, analizuje się nie tylko zjawiska bezpośrednio powiązane z prawdopodobną katastrofą, ale również jej obce. Poszukuje ona podobieństw w mechanizmach pojawiania się katastrof, włączając w to powiązania o niejawnym charakterze. Jest ona szczególnie przydatna w sytuacjach, kiedy zachodzące zjawiska trudno jest opisać za pomocą zależności analitycznych. Porównanie podobieństwa charakteru zmian różnych parametrów istotnie upraszcza badania analityczne, w wielu przypadkach umożliwiając matematyczny opis zjawiska. Interesujące efekty można uzyskać wykorzystując do wyszukiwania podobieństw metody częstotliwościowe. Podstawową wadą metody jest konieczność wyszukiwania i późniejszego przetwarzania analogii, co na chwilę obecną nie jest dostatecznie sformalizowane. Ponadto, określenie ewentualnych

podobieństw wymaga przetworzenia ogromnej ilości danych, co zazwyczaj jest wyjątkowo czasochłonne.

Również inne techniki analizy porównawczej znalazły zastosowanie do prognozowania katastrof. Przykładem ich wykorzystania jest *metoda porównania szybkości zmian*. Analizie podlegają w niej czynniki, z pozoru nie związane z prognozowaną katastrofą, niejawnie wpływające na zachodzące zjawiska. Użycie metody pozwoliło wykryć szereg prawidłowości występowania katastrof, w szczególności powiązanie ich z innymi procesami zachodzącymi w środowisku. Przykładowo, w wyniku wieloletnich obserwacji meteorologicznych określono, że trzęsienia ziemi zachodzą głównie w okresie gwałtownych globalnych i lokalnych zmian stanu atmosfery. W szczególności stwierdzono, że poprzedzają je fronty atmosferyczne oraz gwałtowna zmiana ciśnienia. W ostatnim dziesięcioleciu, dzięki szerokiej dostępności funkcjonujących w czasie rzeczywistym, autonomicznych urządzeń monitoringu lokalnego, metody te rozwijają się nadzwyczaj szybko. Różnorodność mierzonych wielkości oraz ciągłość pomiarów, pozwalają uwzględnić przy prognozowaniu gradienty śledzonych parametrów. W czasie rzeczywistym są one porównywane z wartościami archiwalnymi, zarejestrowanymi bezpośrednio przed pojawieniem się katastrofy [41], [42], [43].

*Metody analizy energetycznej* oparte są na permanentnym śledzeniu zmian potencjałów energetycznych środowiska. Przykładowo, przy prognozowaniu trzęsień ziemi, śledzone jest sejsmiczne pole falowe. W tym przypadku, metoda opiera się na monitoringu geodynamicznym, pozwalającym ocenić wpływ wymuszeń dynamicznych na badany system [41], [42]. Analiza wszelkich anomalii, pozwala prognozować zachowanie systemu dla różnych wymuszeń zewnętrznych. Podobne metody można wykorzystywać do analizy wielu zjawisk naturalnych, w tym również w obszarze biologii.

*Metoda poziomów krytycznych* analizuje wartości wskaźników uprawdopodobniających pojawienie się katastrof. Jej najważniejszą zaletą jest łatwość realizacji, bowiem nie wymaga ona zastosowania skomplikowanego aparatu matematycznego, wspomaganego przez rozbudowane narzędzia informatyczne. Działanie metody sprowadza się do ciągłej analizy wartości wybranych parametrów, na których podstawie można przewidzieć wystąpienie katastrofy. Jej podstawową wadą są rozbieżności wartości parametrów krytycznych dla różnych badanych lokalizacji. Okazuje się, że w jednym miejscu może zostać osiągnięta wartość krytyczna śledzonego parametru, podczas gdy w pozostałych lokalizacjach podobne znaczenie będzie poniżej, progu warunkującego wystąpienie katastrofy. Niestety, nie są znane proste metody określania wartości krytycznej parametru w innych lokalizacjach obszaru. Również przyczyny gwałtownego wzrostu parametru mogą być różne i niekoniecznie wiązać się ze zjawiskiem wywołującym katastrofę. Poprawy efektywności metody, należy upatrywać w określeniu, na podstawie długotrwałej obserwacji, korelacji pomiędzy wartością śledzonego parametru, a pojawianiem się zjawisk o charakterze katastroficznym [41], [42].

*Metoda bezwymiarowych współczynników względnych* ocenia wartości złożonych współczynników, określanych na bazie zbioru charakterystyk środowiskowych, uprawdopodobniających wystąpienie katastrofy. W najprostszym przypadku, metoda ta jest modyfikacją poprzedniej i wykorzystuje relacje pomiędzy aktualną wartością parametru, a jego maksymalnym, zarejestrowanym znaczeniem. Możliwe jest również użycie współczynnika bezwymiarowego, określanego za pomocą wyrażenia matematycznego, opartego na zbiorze wybranych parametrów środowiska lub śledzonego obiektu. Obecnie, metody te są wykorzystywane rzadko, w szczególności nie są one stosowane w badaniach analitycznych. Znacznie lepszym rozwiązaniem okazuje się śledzenie bezwymiarowych różniczkowalnych funkcji zmiany badanego czynnika. Podejście takie, zapewnia dodatkowo śledzenie charakteru i tempa zmian współczynników [41], [44].

Aktualnie, z uwagi na ogólnodostępność funkcjonującego w czasie rzeczywistym monitoringu środowiskowego, szerokie zastosowanie znajdują *instrumentalne metody prognozowania*. Swoje funkcjonowanie opierają one na szerokim zastosowaniu wielopoziomowego monitoringu fizycznych, chemicznych i biologicznych parametrów środowiska, których zmiany sugerowałyby możliwość pojawiania się zagrożenia. Współczesne technologie monitoringu obejmują: śledzenie stanu środowiska oraz krytycznych obiektów; gromadzenie, przetwarzanie i ocenę informacji o charakterystykach zagrożeń naturalnych i technologicznych; technologie ekspercko-analityczne [11], [23]. Chociaż metody instrumentalne są szeroko wykorzystywane i powszechnie uważane za jedne z najskuteczniejszych, pozwalają one opracowywać wyłącznie prognozy dla obszarów objętych monitorowaniem. Z uwagi na znaczące koszty realizacji, pokrycie monitoringiem wszystkich zagrożonych stref jest niemożliwe i systemy prognozowania tego typu mają ograniczony obszar działania.

Sposobem na poprawę trafności prognoz jest jednoczesne wykorzystanie kilku metod, opierających się na różnych danych wejściowych. Podejście to wykorzystuje *kompleksowa metoda szacowania*, która opiera się na następujących założeniach:

1. Każda z wykorzystywanych metod powinna rozróżniać i akceptować obiekt, dla którego tworzone będą prognozy;
2. Różne metody powinny dostarczać różnych informacji o badanym obiekcie;
3. Zwiększenie w zestawie liczby metod wykorzystujących różną podstawę fizyczną, zapewnia poszerzenie informacji o jakościowych charakterystykach obiektu;
4. Zwiększanie w zestawie liczby metod o tej samej podstawie fizycznej poprawia rozdzielczość metody złożonej, w odniesieniu do badanych obiektów.

Zaletą metod tej grupy jest heterogeniczność prognozowania zagrożeń: są one oceniane na podstawie wielu różnorodnych czynników, co bezsprzecznie poprawia trafność prognoz. Wspomniana heterogeniczność postrzegana jest również jako

istotna wada. Zarzuca się im brak systematyzacji procesu analizy zagrożeń, szczególnie w przypadku, kiedy badany jest wpływ wielu czynników posiadających różną naturę fizyczną, ale działających na obiekt jednocześnie. Nie zawsze pozwalają one zrozumieć i uwzględnić mechanizmy rozwoju zagrożenia. Z tego i kilku innych powodów uważa się, że metody te znajdują się w początkowej fazie rozwoju. Ich doskonalenie wymaga dogłębnego zrozumienia relacji pomiędzy różnymi typami zagrożeń, co jest zadaniem wyjątkowo skomplikowanym, wymagającym całościowych badań ekosystemu.

Szczególnym przypadkiem prognozowania zagrożeń w zawężonej czasoprzestrzeni jest *analiza ryzyka* [23], [38]. Do poprawy wiarygodności prognoz, wykorzystuje ona praktycznie wszystkie znane metody monitoringu środowiskowego oraz analityczne techniki prognozowania. Ich dokładność, w pierwszej kolejności, zależy od kompletności uwzględnienia czynników wpływających na zaistnienie i przebieg katastrofy. W odróżnieniu od tradycyjnych metod szacowania ryzyka, w tym przypadku, uwzględnia się wszystkie wzajemne powiązania pomiędzy środowiskiem naturalnym, technologicznym i socjalnym. Metodyka analizy ryzyka, może być realizowana na bazie poniższych trzech podejść:

1. Podejścia *probabilistyczno-statystycznego*, wykorzystywanego w prognozowaniu długoterminowym na podstawie wieloletniej analizy częstotliwości występowania katastrof;
2. Podejścia *probabilistyczno-deterministycznego*, przygotowującego prognozy średnioterminowe oparte na wieloletnich obserwacjach środowiska, ustalonych wcześniej przestrzenno-czasowych prawidłowościach przebiegu zjawisk oraz ich cykliczności;
3. Podejścia *deterministyczno-probabilistycznego*, stosowanego do określania prognoz krótkoterminowych, w oparciu o pojawiające się zwiastuny.

Metody tej grupy posiadają wszystkie wady metod opartych na statystyce i cykliczności zjawisk. Podstawowym problemem jest tutaj dobór właściwych rozkładów wielkości losowych, których zmiana tworzy podlegające ocenie ryzyko. Innym problemem jest wysoki poziom nieokreśloności badanych zjawisk, wynikający, przede wszystkim, z niekompletności posiadanych informacji. Obecnie, obserwujemy stopniową zmianę paradygmatu badań i przejście ich na jakościowo nowy poziom, bazujący na technologiach informacyjnych, telemetrii i modelowaniu matematycznym. Powyższe nauki stosowane stanowią podstawę interdyscyplinarnego systemu wiedzy o dynamice nieliniowych systemów złożonych [42], [43].

Ostatnią analizowaną metodą prognozowania jest zastosowanie *matematycznej teorii katastrof*, będącej działem matematyki opartym na modelowaniu matematycznym nieodwracalnych procesów, przebiegających w nieodwracalnym czasie fizycznym. Najważniejszymi jej elementami są: teoria bifurkacji równań różniczkowych oraz teoria osobliwości odwzorowań gładkich. Czasami MTK jest nazywana teorią morfogenezy lub teorią przejść nieciągłych. Wykorzystanie teorii katastrof do prognozowania jest mało praktyczne, do tego celu znacznie lepiej nadają się

opisane wcześniej specjalizowane metodyki, bazujące na różnych dziedzinach nauki, w tym również i na samej teorii katastrof. Szczególne znaczenie, MTK odgrywa w obszarze terminologicznym i klasyfikacyjnym. Jej zastosowanie pozwala ujednoczyć aparat pojęciowy oraz formalnie sklasyfikować znane zagrożenia [29], [30], [31].

Jednym z najważniejszych zadań stojących przed współczesnymi badaniami nad katastrofami jest maksymalizacja skuteczności prognozowania, która, szczególnie dla prognoz średnio- i długoterminowych, jest obecnie niesatysfakcjonująca. Nie da się jej osiągnąć bez radykalnej zmiany metodyki monitorowania obiektów i środowiska. W szczególności, konieczne jest szerokie zastosowanie sieci sensorowych i nowych typów czujników pomiarowych, pozwalających wykonywać w czasie rzeczywistym pomiar większości istotnych parametrów środowiska. Zastosowania sieci sensorowych do monitorowania zagrożeń nie ograniczają się wyłącznie do danej grupy zjawisk. Przydatność tych rozwiązań do obserwacji, przewidywania przebiegu oraz ostrzegania ludności o niebezpieczeństwie dotyczy wszelkich zjawisk, których występowanie może być mierzone, a wyniki pomiarów przesyłane na odległość. Unifikacji, podobnej do tej wykorzystywanej już w sieciach transmisyjnych, bazujących na standardzie IEEE 802.15, wymagają także metody i środki przetwarzania danych pomiarowych oraz formy prezentacji wyników.

Przeprowadzone badania pokazały, że w procedurach prognozowania, nie w pełni wykorzystywane są zwiastuny pojawiania się katastrof. Obecnie, ich zastosowanie, ma w dominującym stopniu charakter intuicyjny i niezbędne jest opracowanie formalnych podstaw ich klasyfikacji i wykorzystania w procesie prognozowania.

Prognozowanie i przeciwdziałanie katastrofom, dotyczy obecnie szerokiego spektrum działań, obejmujących rozwiązanie problemów z obszaru nauk ścisłych i stosowanych, szkoleń, zarządzania kryzysowego i problemów geopolitycznych włączających opracowanie i wdrożenie nowych przepisów prawa międzynarodowego. Tylko podejście interdyscyplinarne zapewni osiągnięcie satysfakcjonujących rezultatów.





## ROZDZIAŁ 2

### Zagrożenia technologiczne Podkarpacia

#### 2.1. Środowisko naturalne człowieka

Podkarpacie traktowane jest jako jeden z najczystszych regionów naszego kraju. Województwo posiada przepiękne krajobrazowo tereny, czyste środowisko, niepowtarzalną faunę i florę. To właśnie one predestynują Podkarpacie do roli liczącego się ośrodka turystycznego, a jak wiemy turystyka może być stabilnym miejscem zatrudnienia i źródłem dochodów. W Grecji 20% osób czynnych zawodowo pracuje w turystyce, tworzą oni blisko 17% przychodów budżetowych. W czasie kryzysu, branża turystyczna ucierpiała w tym kraju znacznie mniej niż przemysł i pozostałe usługi. Silną stroną Podkarpacia w tym obszarze jest również profesjonalna kadra, wykształcona przez tutejsze uczelnie.

Oprócz miejsc świetnie znanych turystom, takich jak Łańcut, Baranów Sandomierski, Krasiczyn, Solina, Polańczyk, Cisna czy Wetlina mamy jeszcze wiele innych, nadzwyczaj ciekawych, a mało znanych miejsc. Wystarczy tylko wymienić południowe Roztocze, Pogórze Przemyskie, Beskid Niski czy Pogórze Dynowskie. Szacuje się, że blisko połowa powierzchni Podkarpacia posiada szczególne walory przyrodnicze, co wyraźnie przewyższa średnią krajową. Z drugiej jednak strony, długość szlaków turystycznych w przeliczeniu na jednostkę powierzchni jest jedną z najniższych w kraju, blisko dwukrotnie niższą od średniej ogólnopolskiej. Również udział osób pracujących przy szeroko pojętej obsłudze ruchu turystycznego mamy najniższy w kraju. Bardzo źle wypada także statystyka dotycząca liczby i wykorzystania miejsc noclegowych. Wystarczy porównać ich liczbę na Podkarpaciu i w Małopolsce. U naszych zachodnich sąsiadów miejsc noclegowych jest ponad 3-krotnie więcej. Jeżeli porównamy ilość świadczonych noclegów to ich liczba w Małopolsce jest ponad 4-krotnie, a dla turystów zagranicznych blisko 17-krotnie większa. Rozkład ruchu turystycznego w naszym województwie jest bardzo nierównomierny. Wystarczy podać dane dotyczące liczby odwiedzających parki narodowe: Bieszczadzki odwiedza rokrocznie około 350 tysięcy osób, Magurski tylko 40 tysięcy.

Obecnie, turyści są źródłem liczących się dochodów przez 3-4 miesiące w roku. W pozostałym okresie zainteresowanie wypoczynkiem jest znacząco mniejsze. Wystarczy przyglądnąć się zajętości miejsc noclegowych, która na Podkarpaciu w skali rocznej nie przekracza 25%. Jednak doświadczamy tego nie tylko my, ale znacznie bardziej rozwinięta turystycznie Małopolska, dla której wspomniana zajętość wynosi 34%. W działalności turystycznej niezwykle istotne jest znalezienie niszy, pozwalającej świadczyć nowe usługi, na które jest popyt, a nie ma konkurencji. Tutaj, kolejny już raz, wkraczamy w obszar innowacyjności, tym razem w turystyce. Wbrew pozorom, znalezienie wspomnianej niszy jest możliwe. Coraz więcej

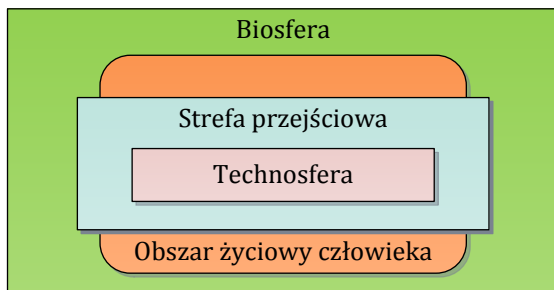
Polaków poszukuje niestandardowych form wypoczynku, niekoniecznie związanych z ekstremalnymi wyczynami, czy też poprawą swojej urody. Często poszukujemy miejsc, gdzie w bezpośrednim kontakcie z przyrodą moglibyśmy poratować swoje zdrowie fizyczne, a coraz częściej i psychiczne. Być może szansą jest powiązanie wypoczynku z profilaktyką zdrowia. W tym obszarze nasze możliwości wykorzystane są w bardzo niewielkim stopniu. Problemem nie będzie tutaj kadra, podkarpackie uczelnie kształcą niezbędnych do tego specjalistów. Aby wszystkie powyższe propozycje mogły być zrealizowane konieczna jest troska o środowisko naturalne. Co zatem określamy tym terminem?

*Środowiskiem naturalnym człowieka* (ŚNC) nazywamy ogół warunków zewnętrznych (fizycznych, chemicznych, biologicznych i społecznych), które mają bezpośredni lub pośredni, natychmiastowy lub przyszły wpływ na działalność człowieka, jego zdrowie oraz potomstwo. ŚNC to system złożony, w którym człowiek musi rozwiązać dwa podstawowe zadania: **a.** Zaspokoić swoje potrzeby dotyczące pożywienia, wody i powietrza; **b.** Utworzyć i wykorzystać ochronę przed negatywnymi wpływami, zarówno ze strony środowiska, jak i innych ludzi.

Źródłami negatywnych oddziaływań są, przede wszystkim, zjawiska zachodzące w biosferze, w szczególności różnorodne klęski żywiołowe i zagrożenia naturalne, ale również konsekwencje bezpośredniej działalności człowieka. Na przestrzeni wieków nieprzerwana walka o swoje istnienie zmuszała człowieka do ciągłego poszukiwania i wdrażania coraz to doskonalszych metod i środków ochrony przed zjawiskami przyrodniczymi, wpływającymi na jego środowisko naturalne. W rezultacie, środowisko to zmieniało swój wygląd, a wraz z nim różnicowały się poziomy i rodzaje zjawisk negatywnych. Powyższym zmianom sprzyjały: **a.** Wysokie tempo wzrostu liczby ludności oraz urbanizacja przestrzeni życiowej; **b.** Wzrost konsumpcji energii i koncentracja zasobów energetycznych; **c.** Intensywny rozwój przemysłu i rolnictwa; **d.** Masowe korzystanie z różnych form transportu; **e.** Wzrost wydatków na cele wojskowe.

Pierwotną przyczyną szeregu negatywnych oddziaływań w przyrodzie i społeczeństwie są czynniki antropogeniczne, które pojawiły się wraz z człowiekiem. Spowodowały one powstanie *sfery technicznej* – sztucznego środowiska, którego prawa i zasady funkcjonowania są dotychczas mało zbadane. Koncepcję interakcji podmiotów ludzkich, biosfery i sfery technicznej przedstawiono na rys. 4. Funkcjonowanie człowieka nie ogranicza się do stworzonej przez niego technosfery, ale obejmuje również samą biosferę i strefę przejściową, zachowującą w różnym stopniu cechy obu środowisk. Wraz z upływem czasu, następuje stopniowe zawężanie obszaru biosfery nieobjętej działalnością człowieka, wraz ze zmniejszaniem się strefy przejściowej.

Struktura przedstawiona na rys. 4 jest przykładem systemu złożonego, którego istotnymi elementami są obiekty techniczne. Do jej analizy należy wykorzystać metody i środki teorii systemów złożonych [45], [27], [28].



Rys. 4. Otoczenie człowieka

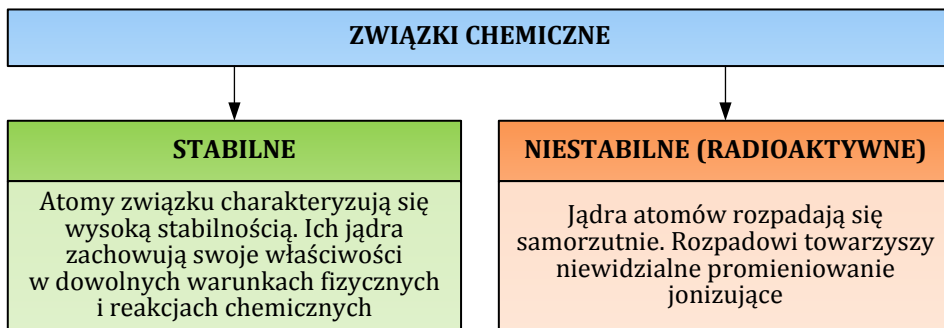
## 2.2. Technologiczne czynniki katastroficzne

### 2.2.1. Pojęcie katastrofy technologicznej

*Katastrofa technologiczna* to rodzaj zdarzeń o masowych skutkach [20], [11], [10], [41], [39], [40]. Podobnie jak katastrofa naturalna [4], [15] może ona pociągać za sobą masowe zgony, a także katastrofę ekologiczną. W odróżnieniu od ataków terrorystycznych, katastrofy technologiczne mają charakter losowy i są bardzo trudne do przewidzenia. Choć skutki, tego typu katastrof, różnią się od skutków katastrof naturalnych, również w tym przypadku może pojawić się panika, paraliż transportowy, utrata autorytetu władzy [5], [6]. Z prawnego punktu widzenia, katastrofy technologiczne są klasyfikowane jako sytuacje nadzwyczajne.

### 2.2.2. Awaryjne na obiektach z materiałami promieniotwórczymi

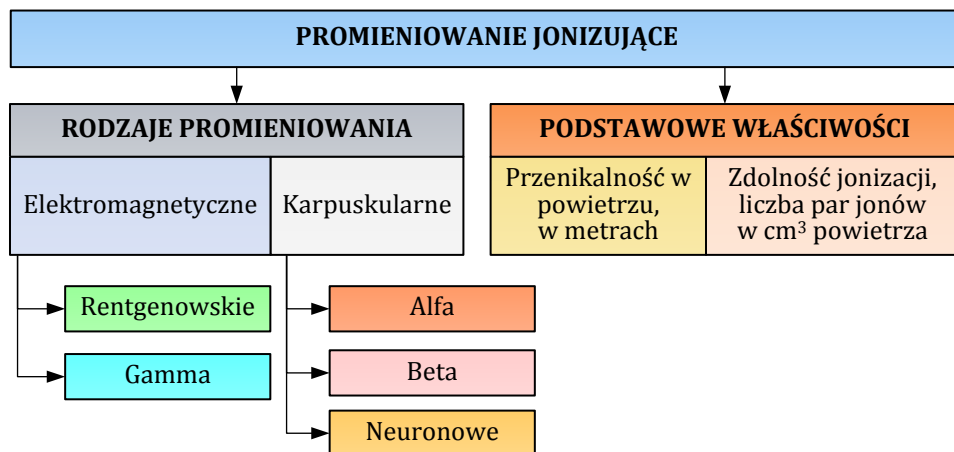
Materiały promieniotwórcze są występującymi w przyrodzie specyficznymi związkami chemicznymi. Klasyfikacja związków została przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5. Klasyfikacja związków chemicznych

Znakomita większość związków jest stabilna i nie stanowi zagrożenia radiacyjnego. W rezultacie radioaktywnego rozpadu niestabilnych związków wydziela się promieniowanie jonizujące, którego energia jest wystarczająca do jonizacji napromieniowanego środowiska. Szczególnie niebezpieczne jest napromieniowanie tka-

nek żywych organizmów oraz substancji konsumowanych przez nie. Jonizacja polega na podziale elektrycznie neutralnego atomu na elektron z ładunkiem ujemnym i jon z ładunkiem dodatnim. Nie każde spotykane w przyrodzie promieniowanie posiada odpowiednio wysoką energię, wystarczającą do jonizacji materii. Klasyfikacja i właściwości różnych typów promieniowania jonizującego została przedstawiona na rys. 6.

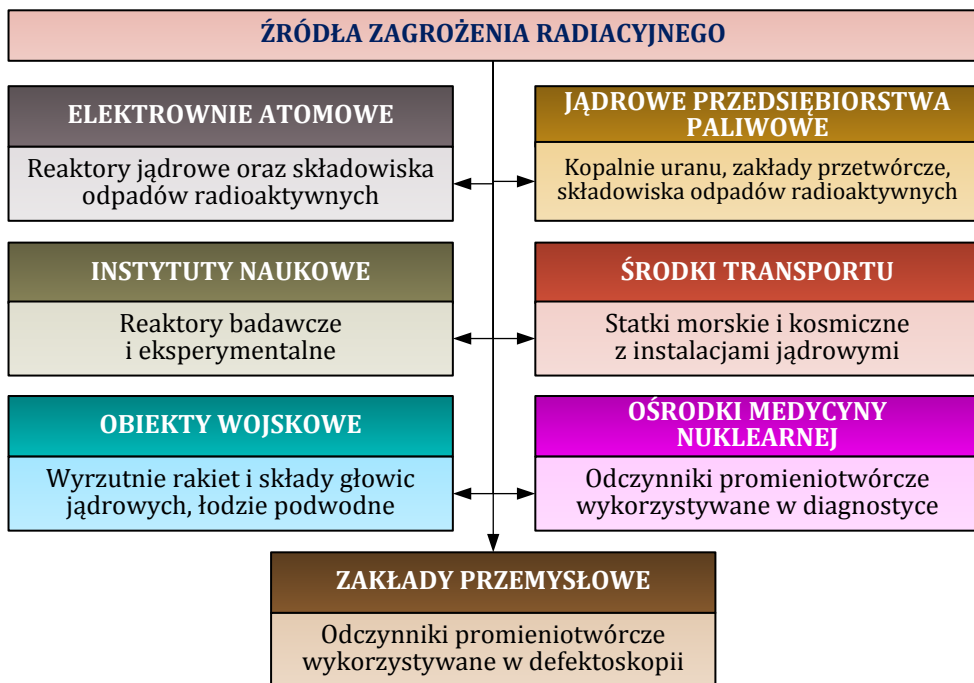


Rys. 6. Rodzaje i właściwości promieniowania jonizującego

Źródła promieniowania jonizującego klasyfikujemy na naturalne i sztuczne. *Naturalnymi* źródłami promieniowania są w pierwszej kolejności naturalne substancje radioaktywne występujące na powierzchni i w skorupie ziemskiej oraz promieniowanie kosmiczne pochodzące od wybuchów na Słońcu i innych gwiazdach. Śladowe ilości substancji radioaktywnych znajdują się również w atmosferze ziemskiej, wodzie oraz faunie i florze. *Sztucznym* źródłem promieniowania jonizującego są, przede wszystkim, obiekty wykorzystujące energię jądrową (elektrownie atomowe, statki i łodzie podwodne z napędem atomowym, statki kosmiczne). Źródłem stosunkowo niewielkiego promieniowania są także diagnostyka i terapia medyczna oraz defektoskopia. Śladowe promieniowanie wytwarzają również starsze telewizory, monitory komputerowe oraz cyferblaty niektórych zegarków.

Dowolny obiekt wykorzystujący materiały jądrowe nazywany jest *źródłem zagrożenia jądrowego*. Są nim również miejsca przechowywania materiałów radioaktywnych, środki transportu wykorzystywane do ich przemieszczania. Klasyfikacja źródeł zagrożenia radiacyjnego przedstawiona została na rys. 7.

Nie ulega wątpliwości, że największym zagrożeniem bezpieczeństwa są elektrownie atomowe oraz obiekty związane z przetwarzaniem odpadów radioaktywnych. Jedyne polski reaktor badawczy znajduje się w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku.

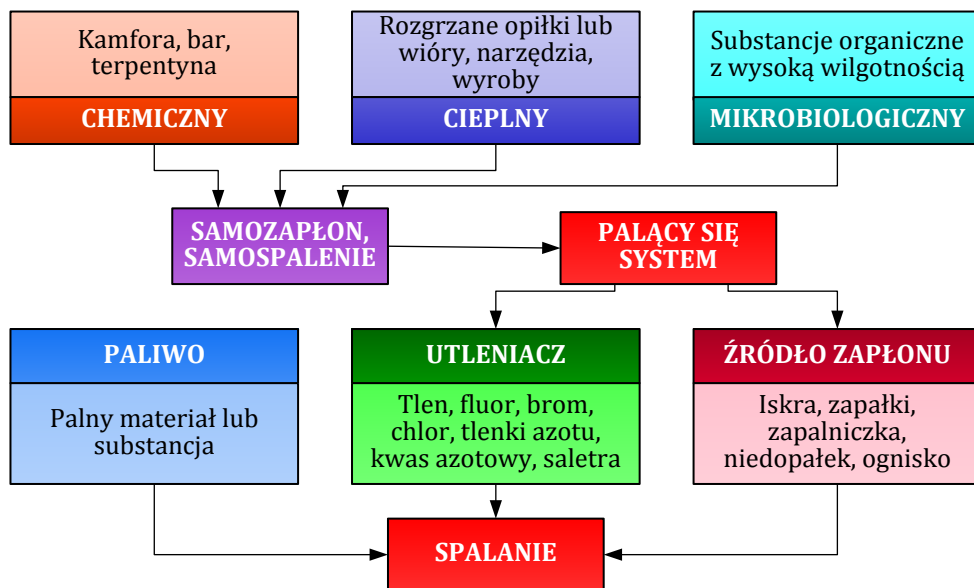


Rys. 7. Źródła zagrożenia radiacyjnego

Odpady promieniotwórcze gromadzone i przetwarzane są w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Świerku oraz Krajowym Składowisku Odpadów Promieniotwórczych w Różaniu. Znaczne ilości substancji radioaktywnych znajdują się także w Ośrodku Radioizotopów, będącym fragmentem NCBJ. Znacznie większe zagrożenie dla mieszkańców Podkarpacia stanowią elektrownie atomowe rozmieszczone w sąsiedztwie naszych granic. Obecnie, w odległości mniejszej niż 1200 km od Rzeszowa funkcjonuje 25 reaktorów różnych typów. W szczególności są to: **a.** 14 reaktorów WWER-440, każdy o mocy 440 MWe: 2 bloki elektrowni Równe (Ukraina), 375 km; 4 bloki elektrowni Paks (Węgry), 588 km; 2 bloki elektrowni Mochovce (Słowacja), 456 km; 2 bloki elektrowni Bohunice (Słowacja), 378 km; 4 bloki elektrowni Dukovany (Czechy), 542 km; **b.** 6 reaktorów WWER-1000, każdy o mocy 1000 MWe: 2 bloki elektrowni Równe (Ukraina), 375 km; 2 bloki elektrowni Chmielnicki (Ukraina), 400 km; 2 bloki elektrowni Temelin (Czechy), 710 km; **c.** 4 reaktory BWR: 1 blok elektrowni Krümmel (RFN) o mocy 1316 MWe, 1183 km; 3 bloki elektrowni Oskarshamn (Szwecja) - o mocach 487, 623 i 1197 MWe, 1093 km; **d.** 1 reaktor RBMK: 1 blok elektrowni Ignalino (Litwa) 1300 MWe, 734 km.

### 2.2.3. Pożary w środowiskach łatwopalnych i wybuchowych

Pożar to proces niekontrolowanego spalania poza przystosowanym do tego celu specjalnym paleniskiem, któremu towarzyszy zniszczenie dóbr materialnych i zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Spalanie to reakcja utleniania, której towarzyszy wydzielanie się znacznych ilości ciepła i światła. Model przebiegu procesu spalania został schematycznie przedstawiony na rys. 8.

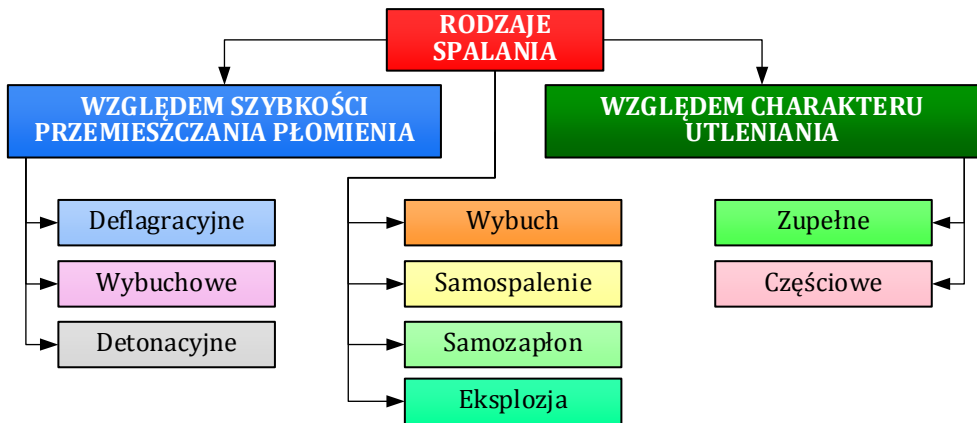


Rys. 8. Model przebiegu procesu spalania

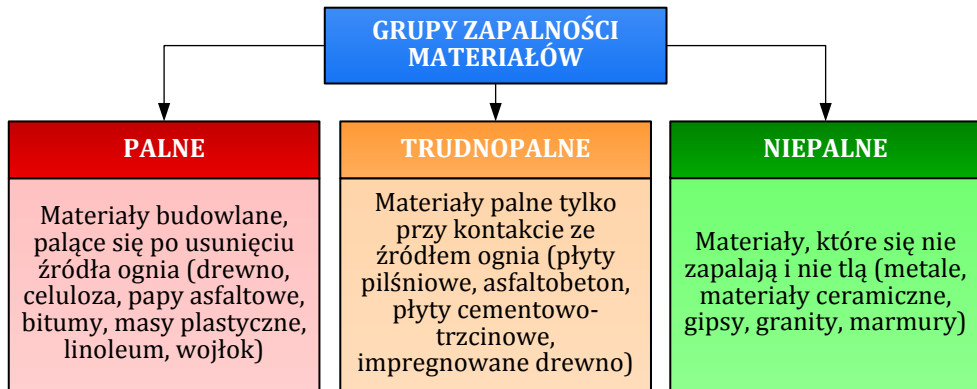
Ze *spalaniem zupełnym* spotykamy się, kiedy zawartość tlenu w powietrzu przekracza 15%. Najważniejszymi produktami spalania są: para wodna, dwutlenek węgla i azot. Spalanie częściowe ma miejsce przy zawartości tlenu poniżej 9%. Jego produktami są m.in. tlenek węgla, ketony, aldehydy i alkohole. Klasyfikację rodzajów spalania przedstawiono na rys. 9.

Powstanie i rozwój pożaru zależą głównie od odporności ogniowej spalanych substancji. Na rys. 10 zaprezentowano klasyfikację odporności wybranych materiałów budowlanych. Pożary klasyfikujemy względem: zewnętrznych cech spalania, miejsca powstawania i czasu rozpoczęcia działań gaśniczych. Klasyfikacja taka została zaprezentowana na rys. 11.

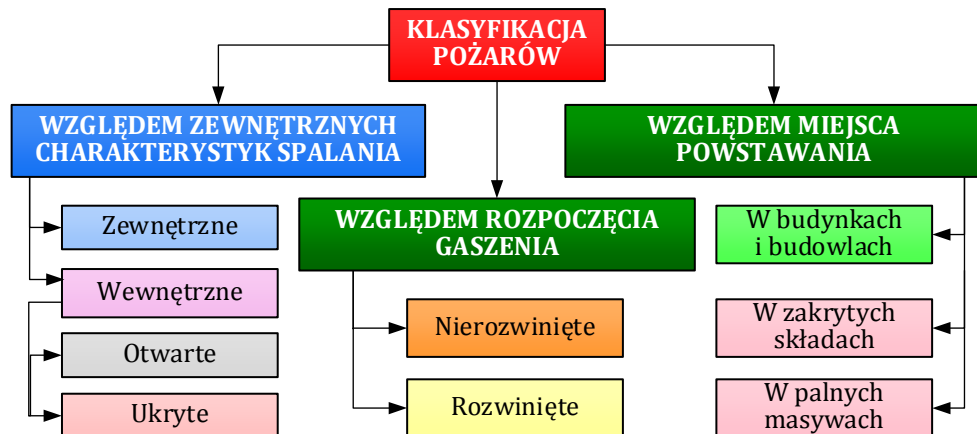
Jako przykład palnych masywów mogą posłużyć znaczne obszary pokryte roślinnością, takie jak: lasy, pola uprawne, nieużytki. Pożary nierozwinięte gaszone są w zarodku przez pracowników obiektu lub pierwszej przybyłej jednostki gaśniczej. Pożary rozwinięte z uwagi na późne wykrycie lub zgłoszenie do dyspozytora straży obejmują znaczny obszar i nie mogą być gaszone samodzielnie.



Rys. 9. Klasyfikacja rodzajów spalania



Rys. 10. Klasyfikacja materiałów względem zapalności



Rys. 11. Klasyfikacja rodzajów spalania

Przyczyny powstawania pożarów dzieli się na trzy podstawowe grupy: antropogeniczne, technologiczne i naturalne. Do *antropogenicznych* zaliczamy m. in.: palenie papierosów w niedozwolonych miejscach, korzystanie z otwartego ognia w miejscach zagrożonych pożarem lub wybuchem, wypalanie ściernisk, łąk i nieużytków, rozpalanie ognisk w niedozwolonych miejscach w okresach wysokiego zagrożenia pożarowego, korzystanie z prowizorycznych urządzeń grzewczych. Najczęstszymi *technologicznymi* przyczynami pożarów są: obecność w pomieszczeniach łatwopalnego kurzu lub włókien, nieszczelności w zbiornikach i urządzeniach zawierających palne ciecze bądź gazy, egzotermiczne reakcje cieplne, nieprzestrzeganie zasad suszenia pasz, naruszenie trybów eksploatacji urządzeń i systemów grzewczych, niepoprawny montaż sieci zasilającej, tarcie w rurociągach przesyłających substancje palne. Do grupy *naturalnych* przyczyn powstawania pożarów zaliczamy, przede wszystkim: elektryczność atmosferyczną oraz klęski żywiołowe.

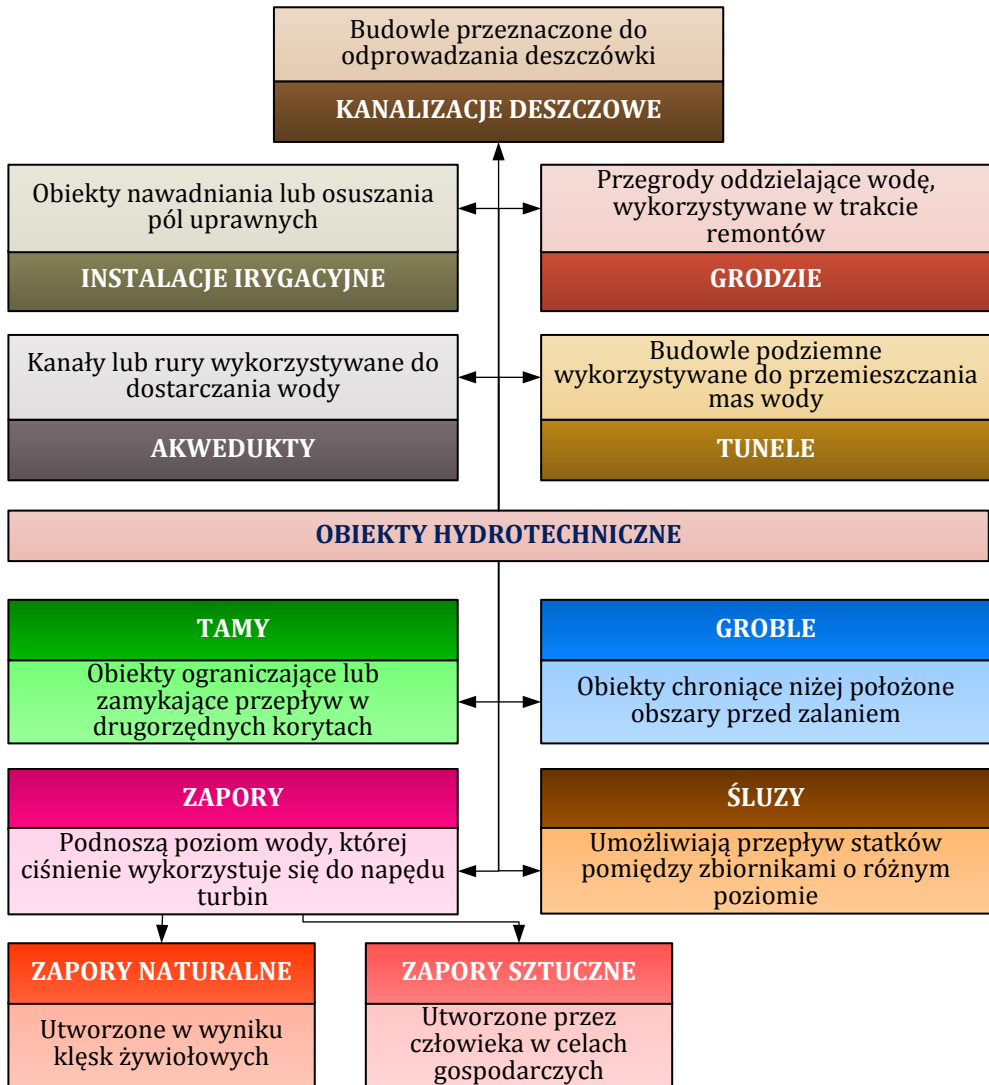
#### 2.2.4. Katastrofy obiektów hydrotechnicznych

*Obiektem niebezpiecznym hydrodynamicznie* (ONH) nazywamy budowlę lub naturalne formacje spiętrzające wodę. Poziom lustra wody po obu stronach ONH jest różny i stanowi istotne zagrożenie. Do grupy ONH zaliczamy zapory naturalne oraz wszystkie hydrotechniczne budowle ciśnieniowe. Pojęciem *budowle hydrotechniczne*, określamy wszelkie obiekty przeznaczone do: wykorzystania energii kinetycznej wody, schładzania procesów technologicznych, melioracji i nawadniania, zaopatrzenia w wodę, ochrony przed niszczącą siłą wody itp. Klasyfikację technologiczną budowli hydrotechnicznych zaprezentowano na rys. 12. Na obszarze województwa podkarpackiego, w pierwszej kolejności, spotykamy niewielkie sztuczne zapory o przeznaczeniu ochronnym.

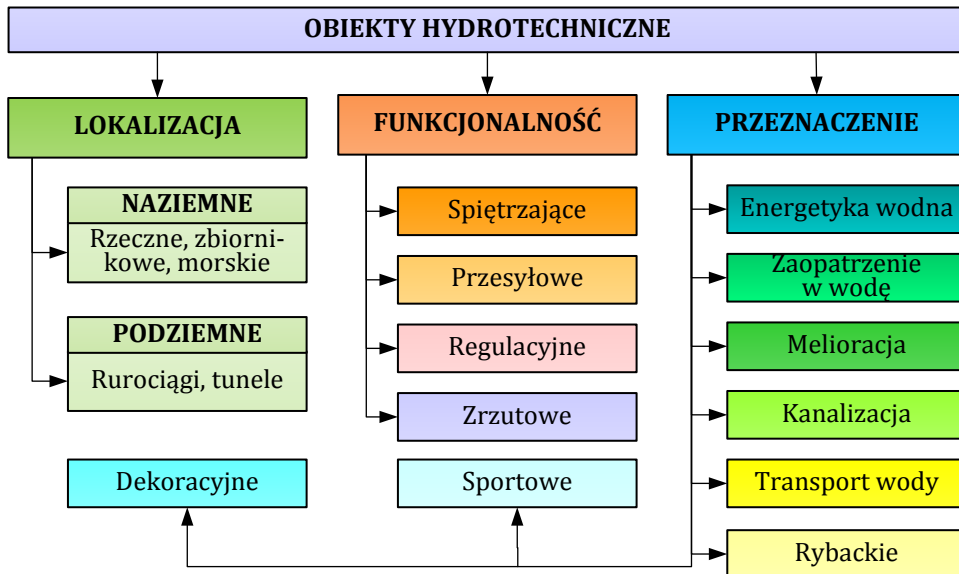
Klasyfikacje: lokalizacyjna, funkcjonalna i celowa obiektów hydrotechnicznych zostały zaprezentowane na rys. 13.

Przyczyny uszkodzenia bądź zniszczenia obiektów hydrotechnicznych dzielimy na naturalne i antropogeniczne. Najczęstszymi przyczynami *naturalnymi* są: trzęsienia ziemi, tąpnięcia, osunięcia i lawiny ziemne, huragany, intensywne opady, przybór wód, zużycie oraz starzenie się. Do *antropogenicznych* przyczyn uszkodzenia obiektów hydrotechnicznych zaliczamy: działania wojenne, dywersję, nieprzestrzeganie zasad eksploatacji, błędy projektowania i defekty konstrukcyjne.





Rys. 12. Technologiczna klasyfikacja obiektów hydrotechnicznych



Rys. 13. Klasyfikacja obiektów hydrotechnicznych

Z punktu widzenia zagrożeń o charakterze katastroficznym, szczególną uwagę należy zwrócić na zbiorniki retencyjne zlokalizowane na Sanie w Solinie oraz Myczkowcach, a także na Wisłoku w Besku. Zbiorniki te położone są w południowej części województwa, w dolnym biegu obu rzek. Ponadto, na terenie Podkarpacia funkcjonuje 30 małych zbiorników retencyjnych o sumarycznej powierzchni 420 ha i pojemności 10 mln m<sup>3</sup>.

*Zapora w Solinie* jest największą budowlą hydrotechniczną w Polsce. Posiada ona długość 664 m, wysokość 82 m i kubaturę 760 000 m<sup>3</sup>. Zapora została zbudowana w latach 1961-68 i zmodernizowana w latach 2000-2003. Tworzy ona Zbiornik Soliński o powierzchni 2200 ha, pojemności 500 mln m<sup>3</sup>, długości 26,6 km i linii brzegowej o długości 150 km. Zlewnię zbiornika od południa ograniczają góry wododziałowe, rozmieszczone na granicy ze Słowacją, a od wschodu granica Państwa z Ukrainą. *Zapora w Myczkowcach* tworzy dolny zbiornik dla Zespołu Elektrowni Wodnych Solina-Myczkowce. Jej budowę rozpoczęto jeszcze w 1920, ale z powodu braku środków przerwano w 1925 roku. Budowę wznowiono w 1956 i zakończono w 1960 roku. Zapora ma długość 460 metrów, wysokość 17,5 m i kubaturę ichtowego rdzenia 216 tys. m<sup>3</sup>. Powierzchnia utworzonego zbiornika to 200 ha, a jego pojemność 11 mln m<sup>3</sup>. *Zbiornik Wodny Besko*, zlokalizowany w miejscowości Sieniawa został oddany do użytku w 1978 roku. Długość betonowej zapory wynosi 174 m, maksymalna wysokość 38 m, powierzchnia zbiornika to 126 ha, a jego pojemność 13 mln m<sup>3</sup>.

W ostatnich latach, w bezpośrednim sąsiedztwie województwa podkarpackiego miała miejsce katastrofa zbiornika retencyjnego w Rapach Dylańskich. Zbiornik o

pojemności 30 tys. m<sup>3</sup>, w wyniku długotrwałych obfitych opadów został zapełniony 90%. W nocy z 30 na 31 lipca 2011 została rozmyta grobla w miejscowości Rapy. Ze zbiornika wyciekło 6 tys. m<sup>3</sup> wody, podtapiając około 100 posesji, w tym 60 domów w Biłgoraju.

Do najbardziej znanych katastrof obiektów hydrotechnicznych na świecie można zaliczyć zdarzenia, które wystąpiły na zaporach Vajont i Malpasset. Pierwsza z nich została zbudowana w latach 1956-61 na rzece Vajont, będącej dopływem Piawy, 100 km na północ od Wenecji. 9 października 1963 r. ze zbocza Monte Toc, na szerokości blisko 3 km, do zbiornika powyżej zapory obsunęło się około 260 mln m<sup>3</sup> mieszaniny ziemi i skał. Powstała przy tym fala powodziowa zniszczyła kilka osiedli po przeciwnej stronie zbiornika. Druga fala przedostała się przez koronę zapory i przemieszczając się z szybkością około 100 km na godzinę dokonała spustoszenia w wąskiej dolinie poniżej zapory. Choć sama zaporę nie ucierpiała szczególnie, zbiornik został w znacznej części zapełniony materiałem skalnym i utracił swoje właściwości retencyjne. Zaporę Malpasset, zlokalizowaną w południowo-wschodniej Francji została zbudowana w latach 1952-54. Miała ona wysokość 66 m, długość 222 m, powierzchnia utworzonego przez nią zbiornika wynosiła 2 km<sup>2</sup> a pojemność 48 mln m<sup>3</sup>. Zaporę została przerwana 2 grudnia 1959 roku w wyniku obsunięcia się posadowionej na piaskowcach wschodniej części tamy. Przerwanie zapory spowodowało powstanie fali o wysokości 40 m, przemieszczającej się z szybkością 70 km/h wzdłuż koryta rzeki Reyran. W obu opisanych katastrofach ich przyczyną były niedokładnie przeprowadzone badania geologiczne. Zignorowane zostały również, symptomy zagrożeń pojawiające się na kilka dni przed katastrofą.

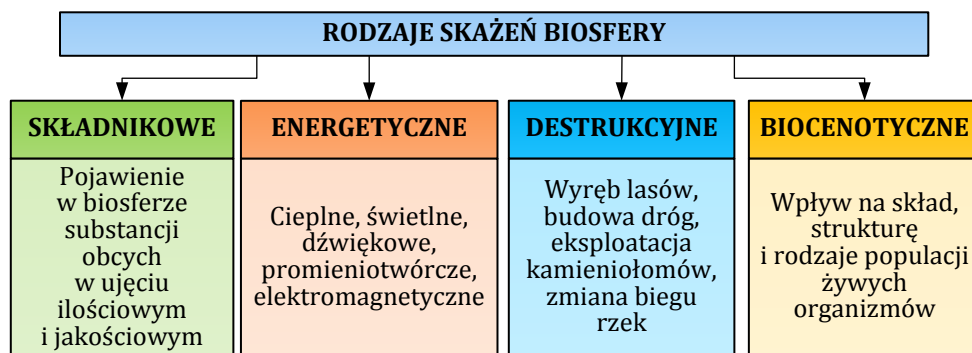
Prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektów hydrotechnicznych, zlokalizowanych na obszarze województwa podkarpackiego należy uznać za **minimalne**, zarówno w skutek przyczyn antropogenicznych, jak również naturalnych. Ponieważ ukształtowanie terenu poniżej zapór nie jest typowo wysokogórskie, szacuje się, że zniszczenie każdej z zapór spowodowałoby powstanie fali o wysokości od 3 do 12 metrów, przemieszczającej się z szybkością do 30 km na godzinę.

Przykładem narzędzi informatycznych, wykorzystywanych do modelowania przerwania zapór wodnych jest pakiet programów *MIKE* firmy DHI Water & Environment. Pozwala on m. in. modelować: powierzchniowe i denne wymywanie zapory ziemnej; zniszczenie przegrody, śluzy lub sekcji grawitacyjnej zapory; lokalizację obszarów zatapianych; rozptył strumieni wody po uszkodzeniu zapory. Innym przykładem narzędzia wykorzystywanego do analizy dowolnych typów zapór jest *Bentley FlowMaster* firmy Bentley.

### 2.2.5. Katastrofy ekologiczne

W wyniku rozwoju przemysłu, transportu, energetyki oraz industrializacji rolnictwa w miejsce biosfery, naturalnego środowiska życia człowieka pojawiła się technosfera. Pojęciem *biosfery* określamy dolną część atmosfery, glebę otaczającą systemy korzeniowe roślin, całą hydrosferę oraz górną część litosfery Ziemi. Bio-

sfera, to część Ziemi zasiedlona przez żywe organizmy. Termin *technosfera* wywodzi się z języka greckiego (*technē* – sztuka, rzemiosło oraz *sphaira* – kula, sfera) i oznacza fragment biosfery, przekształcony za pomocą bezpośredniego i pośredniego wpływu środków technicznych, w celu zapewnienia zgodności ze społeczno-gospodarczymi potrzebami człowieka. Codzienna aktywność ludzka generuje znaczne ilości różnorodnych odpadów naruszających naturalne proporcje pierwiastków w przyrodzie i zanieczyszczających biosferę. Klasyfikację skażeń biosfery przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Klasyfikacja skażeń biosfery

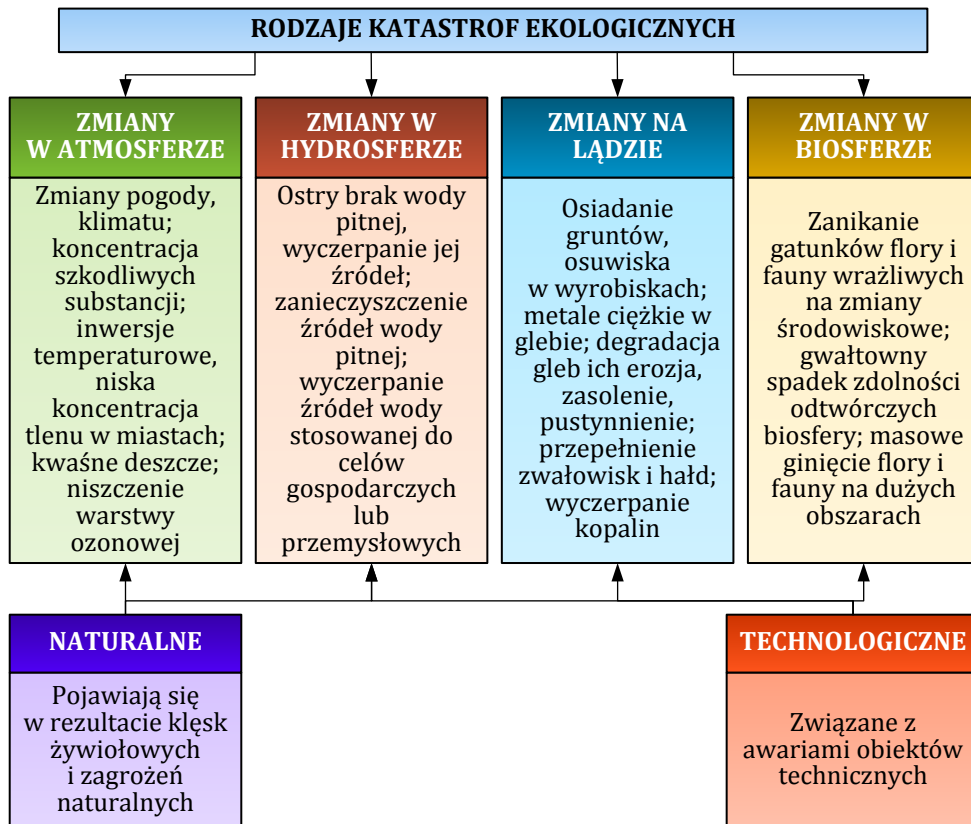
Słowo katastrofa pochodzi od greckiego słowa *katastrophe*, oznaczającego obrót lub przewrót. *Katastrofa ekologiczna* to niezbalansowane, niestacjonarne przekształcanie otoczenia, którego konsekwencją jest istotna zmiana środowiska naturalnego.

Wiek XX obfitował w katastrofy ekologiczne będące pośrednim skutkiem działalności człowieka. Kilka charakterystycznych przykładów takich katastrof przedstawiono poniżej. 26 kwietnia 1986 roku w wyniku zniszczenia czwartego bloku elektrowni atomowej w Czarnobylu doszło do wybuchu reaktora jądrowego i emisji substancji radioaktywnych do atmosfery, wód powierzchniowych i gruntowych. Ze skażonych radioaktywnie terenów wysiedlono 336 tys. osób. W pierwszych dniach po wypadku zmarło 57 napromieniowanych osób. Spośród 600 tys. pracowników biorących bezpośredni udział w likwidacji skutków awarii, do chwili obecnej na nowotwory zmarło ponad 4 tysiące. Szacuje się, że sumaryczne wydatki na usuwanie skutków awarii, ewakuację ludności oraz odszkodowania wyniosły 200 miliardów dolarów.

24 marca 1989 roku, kapitan tankowca *Exxon Valdez* na krótko opuścił mostek. W rezultacie statek uderzył w rafę i do morza wylało się 10,8 mln galonów ropy (ponad 30 tysięcy metrów sześciennych). Ten wyciek nie był największym pod względem ilości, jednak na ogromne koszty usuwania plamy ropy naftowej miała wpływ odległość miejsca katastrofy od brzegu. Likwidacja skutków katastrofy kosztowała 2,5 miliarda dolarów.

13 listopada 2002 roku, podczas silnego sztormu u wybrzeży Hiszpanii uległ zniszczeniu przewożący 77 000 ton oleju opałowego tankowiec *Prestige*. Pod naporem fal, statek przełamał się i zawartość jego ładowni zanieczyściła ocean. Usuwanie skutków tej katastrofy kosztowało około 12 miliardów dolarów.

Klasyfikacja katastrof ekologicznych została przedstawiona na rys. 15.



Rys. 15. Klasyfikacja katastrof ekologicznych

### 2.3. Pojęcie ryzyka i jego interpretacja

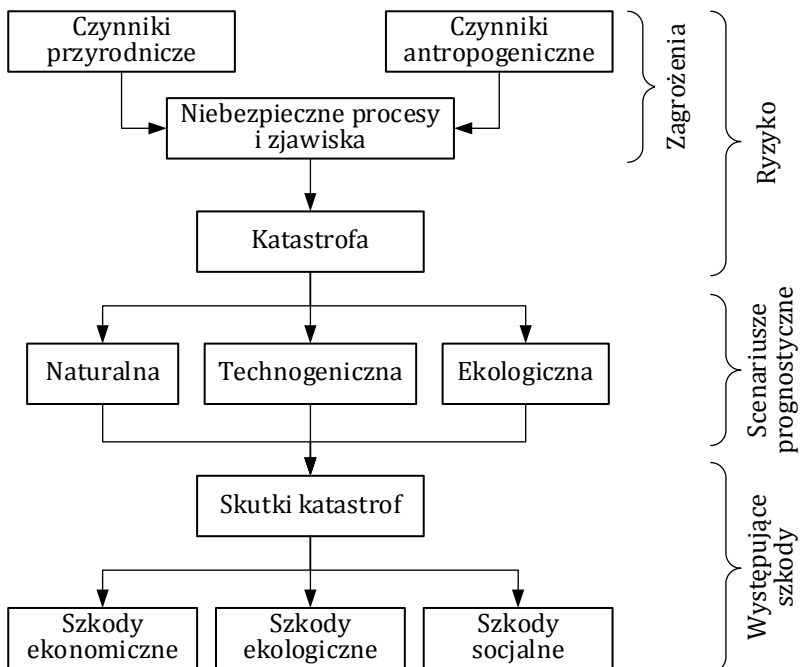
Terminami szeroko wykorzystywanymi w procesie analizy zagrożeń są: *niebezpieczeństwo*, *ryzyko* oraz *katastrofa*. Chociaż formalnie terminy *niebezpieczeństwo* i *ryzyko* mają różne znaczenie, często używane są synonimicznie. Z punktu widzenia analizy zjawisk o charakterze katastroficznym, definicja obu tych terminów nie powinna opierać się na klasycznych określeniach, a bazować na metodologicznych podstawach analizy i oceny zachodzących zjawisk.

W klasycznej literaturze, ryzyko to kombinacja prawdopodobieństwa i skutków wystąpienia niekorzystnych zdarzeń. W szerokim znaczeniu, jest ono charakterystyką sytuacji, posiadającej niepewność pojawienia się niekorzystnych skutków.

W wąskim znaczeniu, ryzyko to ilościowa ocena niebezpieczeństw, która jest określana, jako częstotliwość jednego zdarzenia w przypadku wystąpienia innego. Ryzyko to również nieokreślone zdarzenie lub warunek, który w przypadku wystąpienia ma pozytywny lub negatywny wpływ na reputację firmy, prowadzi do zysków lub strat w wyrażeniu pieniężnym.

Zazwyczaj, ryzyko pojawia się jednocześnie z nieprzewidywalnością i niepewnością przyszłości i wyraża się w postaci oczekiwania na zagrożenia i możliwość ich zaistnienia. Podstawą terminu *ryzyko* jest jego antropocentryczny charakter, pojawienie się ryzyka jest możliwe tylko tam, gdzie narażone jest bezpieczeństwo człowieka.

Można przyjąć, że najtrafniejszym określeniem ryzyka jest przedstawienie go jako ilościowej miary zagrożeń, opisanej prawdopodobieństwem zaistnienia niebezpiecznych wpływów z negatywnymi skutkami. Podstawowym celem określania ryzyka jest wykorzystanie go w procesie podejmowania decyzji. Bazując na powyższych założeniach, dokonano klasyfikacji relacji pomiędzy pojęciami: zagrożenie, katastrofa i ryzyko. Zaproponowana klasyfikacja pozwala traktować powyższe kategorie, jako samodzielne, wzajemnie powiązane komponenty jednolitego systemu. Systemowe odwzorowanie tych kategorii pokazano na rys. 16.



Rys. 16. Systemowe odwzorowanie kategorii: zagrożenie, katastrofa, ryzyko

Głównym przedmiotem dalszych badań będą niebezpieczne procesy i zjawiska, w szczególności ich analiza w warunkach nieokreśloności, z wykorzystaniem immunologii i genetyki.

## ROZDZIAŁ 3

### Obiekty techniczne jako grafy

#### 3.1. Grafy i analiza żywotności

Bezpieczeństwo to jeden z najistotniejszych problemów dotyczących praktycznie wszystkich aspektów działalności współczesnego człowieka. Dla znacznej części społeczeństwa, kojarzy się ono, przede wszystkim, z przestępczością pospolitą, terroryzmem oraz działaniami wojennymi. Jednak zagrożenia dla zdrowia i życia człowieka, a także gromadzonych przez niego wartości materialnych znacznie częściej są skutkiem katastrof technologicznych i naturalnych. W wyniku charakterystycznego dla drugiej połowy XX wieku gwałtownego, społeczno-gospodarczego rozwoju świata, pojawiły się wielkoskalowe systemy techniczne, wymagające niespotykanej dotąd politycznej, gospodarczej, a nawet wojskowej aktywności podmiotów biznesowych, nierzadko obejmującej swym zasięgiem całe kontynenty.

Budowane systemy techniczne, często funkcjonujące autonomicznie, wyposaża się w rozbudowane sieci zasilające, własną strukturę transportową, sterującą i zarządzającą. Wykorzystują one szeroko, zaawansowane metody pozyskiwania zasobów ludzkich, technologicznych i surowcowych. Niestety, ich często niekontrolowanemu rozwojowi, towarzyszy wzrost wrażliwości środowiska na działanie czynników zewnętrznych o charakterze katastroficznym, takich jak gwałtowne zjawiska pogodowe, powodzie, trzęsienia ziemi, celowe lub losowe szkodliwe działania techniczne [5], [11], [44], [23], [43]. Opisane zjawiska nasilają się z upływem czasu.

Jednym z najważniejszych kierunków badań w obszarze bezpieczeństwa obiektów technicznych (OT) jest analiza żywotności, która obok niezawodności i odporności na uszkodzenia jest podstawową charakterystyką określającą bezpieczeństwo eksploatacji OT. Szeroko wykorzystywanym, efektywnym sposobem badania żywotności obiektu jest przedstawienie go w postaci modelu grafowego. W takim przypadku, wskaźnikiem żywotności badanego OT będą pochodne wierzchołkowej lub krawędziowej spójność grafu modelu [46], [47], [48], [49], [50].

Metody teorii grafów odgrywają szczególną rolę przy analizie złożonych obiektów technicznych, takich jak sieci teleinformatyczne. W szczególności, stanowią one podstawę: analizy żywotności sieci; oceny poziomu dostępności informacji; projektowania sieci połączeniowych; optymalizacji administrowania sieciami korporacyjnymi; podwyższenia ich przepustowości; ulepszania routingu; zapewniania i poprawy bezpieczeństwa; analizy rozprzestrzeniania się złośliwego oprogramowania.

W niniejszym rozdziale monografii zaprezentujemy wykorzystanie metod i środków teorii grafów do reprezentacji obiektów technicznych, w szczególności z ich pomocą opisywać będziemy regionalne systemy monitoringu środowiskowego.

### 3.2. Elementy teorii niezawodności

Sieci sensorowe wykorzystywane w regionalnych systemach monitoringu można traktować jako jednorodne systemy pomiarowo-obliczeniowe (JSPO). Przemawia za tym dysponowanie przez nie zarówno możliwościami pomiaru wielkości fizycznych i chemicznych charakteryzujących środowisko. Dzięki dysponowaniu własną mocą obliczeniową są one autonomiczne w swoich działaniach, a gęste połączenia często oparte na topologii kraty pozwalają zaliczyć je do grupy systemów jednorodnych. Inną charakterystyczną cechą sieci sensorowych jest możliwość rekonfiguracji ich architektury, która wykonywana jest metodami programowymi.

Niezawodność i żywotność to wzajemnie powiązane pojęcia, które dla jednorodnych systemów pomiarowo-obliczeniowych posiadają specyficzne właściwości. Dalej, pod pojęciem *niezawodności* JSPO będziemy rozumieć zmieniane programowo właściwość ich struktury funkcjonalnego współdziałania pomiędzy zasobami, przy której zapewniane jest bezawaryjne funkcjonowanie systemu w przedziale zadanego czasu. Pod pojęciem żywotności systemu będziemy rozumieć realizowaną programowo właściwość programowego nastrojenia struktury i organizacji współdziałania funkcjonalnego pomiędzy jej komponentami JSPO, dla których odmowy lub procedury odtworzenia dowolnych węzłów pomiarowo-obliczeniowych nie naruszają wykonania równoległych zadań obliczeniowych, a wyłącznie zmniejszają lub zwiększają czas ich realizacji. Zadania pomiarowe są w takim przypadku przejmowane przez węzły sąsiednie.

W celu scharakteryzowania jakości funkcjonowania JSPO (dokładniej zasad programowej rekonfiguracji w JSPO) koniecznym jest opracowanie zestawu wskaźników niezawodności i żywotności, a także efektywnych metod ich obliczania. Problemy związane są z następującymi faktami:

1. W chwili obecnej nie są znane dostatecznie pełnie i udokumentowane zestawy wskaźników niezawodności i żywotności, w szczególności dla systemów o dużym rozmiarze wypełniających jednocześnie inne niż obliczeniowe funkcje (pomiar, komunikacja);
2. Metody wykorzystywane w teorii niezawodności charakteryzuje wysoka złożoność, co z punktu widzenia szerokiego wykorzystania mobilnych urządzeń komputerowych nie jest korzystne;
3. Znane metody pozwalają analizować parametry niezawodnościowe systemów złożonych ze stosunkowo niewielkiej ilości elementów składowych, regionalne JSPO mogą być tworzone przez tysiące węzłów;
4. Złożoność określania charakterystyk dodatkowo wzrasta w sytuacji, kiedy w oparciu o parametry probabilistyczne wyznaczane są właściwości przejściowego trybu funkcjonowania systemu.

Koniecznym stało się zatem opracowanie metod określających niezawodność i żywotność jednorodnych systemów pomiarowo-obliczeniowych składających się z dowolnej liczby komponentów. W tym celu, w rozważaniach należy uwzględnić dwie uogólnione klasy systemów pomiarowo-obliczeniowych: żywotne JSPO oraz



systemy ze strukturalną nadmiarowością. Wynikiem prowadzonych badań powinno być m. in. określenie wskaźników jakości funkcjonowania takich systemów w stanie przejściowym i stanie stacjonarnym funkcjonowania.

Rozwiązanie postawionych powyżej zadań jest możliwe na bazie dwóch podstawowych metod. W pierwszej można wykorzystać nowe adekwatne modele stochastyczne, prowadzące do prostych formuł obliczeniowych określających wskaźniki niezawodności JSPO. Takie podejście jest wystarczająco efektywne przy określaniu takich wskaźników niezawodności jak wartości oczekiwane różnorodnych przypadkowych zdarzeń. Polega ono na stworzeniu systemu liniowych równań różniczkowych pierwszego stopnia bezpośrednio dla wartości oczekiwanej. Rozwiązanie systemu takich równań przy zadanych warunkach początkowych nie przedstawia szczególnej trudności. Liczbowe wartości wskaźników mogą być określone na podstawie wyprowadzonych wzorów nawet analitycznie, bez wykorzystania metod numerycznych.

Drugie podejście zakłada, że funkcjonowanie JSPO będzie opisane za pomocą tradycyjnych modeli stochastycznych, a liczbowe wartości wskaźników będą poszukiwane za pomocą metod obliczeń przybliżonych. Dane podejście jest dostatecznie efektywne w przypadku obliczania takich wskaźników niezawodności, które są prawdopodobieństwami różnych zdarzeń. W metodzie tej tworzone są równania różniczkowe dla prawdopodobieństw stanów systemu z uwzględnieniem podzbioru pochłanianych stanów, zadawane są warunki początkowe. Następnie system równań różniczkowych z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a jest sprowadzany do układu równań algebraicznych, z wykorzystaniem zasady Kramera określa się rozwiązanie układu równań algebraicznych, przy czym rozwiązanie określa się za pośrednictwem wielomianów, obliczanych rekurencyjnie, udowodniane są właściwości pierwiastków wielomianów, pozwalające w sposób przybliżony określić ich wartości. Po obrocie przekształcenia Laplace'a wyliczane są formuły określające wskaźniki niezawodności, dla określenia wartości liczbowych tworzone są stosowne programy.

W celu stworzenia adekwatnych modeli JSPO niezbędna jest znajomość praw rozkładu czasu bezawaryjnej pracy i czasu odtworzenia elementarnej maszyny. W tym celu zebrany został materiał statystyczny dotyczący eksploatacji systemu obliczeniowego. W rezultacie obróbki statystycznej ustalono, że hipotezy o wykładniczym rozkładzie czasu bezawaryjnej pracy węzłów i czasu odtworzenia nie przeczą danym eksperymentalnym.

**Funkcja niezawodności.** Funkcją niezawodności węzła bazowego nazywamy prawdopodobieństwo tego, że w odcinku czasu  $[0, t]$  w sprawnej maszynie nie będzie miała miejsca ani jedna odmowa:

$$r_0(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda$  – intensywność występowania odmowy. Uwzględniając wyrażenie (1) można prosto ustalić, że średni czas bezawaryjnej pracy jest równy

$$\int_0^{\infty} t d[1 - r_0(t)] = - \int_0^{\infty} t dr_0(t) = \int_0^{\infty} r_0(t) dt = 1/\lambda. \quad (2)$$

Z wyrażenia (2) wynika, że  $\lambda$  to średnia liczba uszkodzeń pojawiających się w węźle w jednostce czasu. Prawdopodobieństwo tego, że w przeciągu czasu  $t$ , pojawi się  $k$  uszkodzeń przedstawione jest wyrażeniem

$$r_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

przy tym

$$\sum_{k=0}^{\infty} r_k(t) = 1. \quad (4)$$

Rzeczywiście, średnia liczba uszkodzeń pojawiających się w przedziale czasu  $[0, t]$  jest równa

$$\sum_{k=1}^{\infty} k r_k(t) = e^{-\lambda t} \lambda t \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} = \lambda t, \quad (5)$$

ponieważ ostatnia suma w wyrażeniu (5) bezsprzecznie jest równa  $e^{\lambda t}$ . W ten sposób można przyjąć, że strumień uszkodzeń elementarnych maszyn jest strumieniem Poisson'owskim.

Funkcją odtwarzalności elementarnej maszyny będziemy nazywać prawdopodobieństwo tego, że w odcinku czasu  $[0, t]$  uszkodzony węzeł zostanie odtworzony z wykorzystaniem sprzętu serwisowego:

$$u(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (6)$$

gdzie:  $\mu$  – intensywność odtworzenia. Mówiąc inaczej,  $\mu$  to średnia liczba węzłów, odtwarzanych z wykorzystaniem jednego zestawu sprzętu w jednostce czasu. Odpowiednio  $\mu^{-1}$  jest wartością oczekiwaną czasu odtworzenia uszkodzonej maszyny jednym urządzeniem odtwarzającym.

**Funkcja gotowości.** Funkcją gotowości węzła będziemy nazywać prawdopodobieństwo  $s(t)$  tego, że w momencie czasu  $t \geq 0$  maszyna ta jest sprawna. Jeżeli znane są wartości  $r(t)$  i  $u(t)$  to nie stanowi specjalnej trudności określić wartość  $s(t)$  przy początkowych warunkach  $s(0) = 1$  lub  $s(0) = 0$ . Rzeczywiście, uwzględniając rozkład w szereg MacLaurina można wypisać odpowiednio prawdopodobieństwo tego, że węzeł za  $\Delta t$  nie zostanie uszkodzony i prawdopodobieństwo tego, że za  $\Delta t$  zostanie uruchomiony ponownie, tj.

$$r(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \frac{1}{1!} \lambda \Delta t + o(\Delta t), \quad (7)$$

$$u(\Delta t) = 1 - e^{-\mu \Delta t} = \mu \Delta t + o(\Delta t). \quad (8)$$

W związku z niezależnością i sprzecznością analizowanych zdarzeń można zapisać:

$$\begin{aligned} s(t + \Delta t) &= s(t)r(\Delta t) + [1 - s(t)]u(\Delta t) = \\ &= s(t)(1 - \lambda\Delta t) + [1 - s(t)]\mu\Delta t + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (9)$$

Przenosząc  $s(t)$  do lewej części wyrażenia (9), dzieląc na  $\Delta t$  i przechodząc do granicy w obu częściach przy  $\Delta t \rightarrow 0$ , otrzymamy następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{d}{dt}s(t) = \mu - (\lambda - \mu)s(t) \quad (10)$$

Rozwiązaniami równania (10) dla  $s(0) = 1$  i  $s(0) = 0$  będą odpowiednio funkcje:

$$s(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (11)$$

$$s(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (12)$$

Współczynnikiem gotowości węzła będziemy nazywać

$$s = \lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (13)$$

W ten sposób,  $s$  to prawdopodobieństwo tego, że w trybie stacjonarnym (przy  $t \rightarrow \infty$ ) węzeł jest sprawny.

Wskaźniki określone wyrażeniami (1), (2), (3), (6), (11), (12) oraz (13) wystarczająco pełno charakteryzują niezawodność funkcjonowania systemu pomiarowo-obliczeniowego.

Załóżmy, że istnieje JSPO złożony z  $N$  elementarnych węzłów. Węzły te nie są absolutnie niezawodne, jednak ich możliwości funkcjonowania mogą być odtwarzane. Niech  $\lambda$  oznacza intensywność strumienia usterek, a  $\mu$  – intensywność odtworzenia za pomocą jednego z  $m \geq 0$  urządzeń serwisowych. Dla dalszych rozważań przyjmiemy, że wartość  $1/\mu$  składa się odpowiednio z średniego czasu odtworzenia i średniego czasu odnalezienia uszkodzonego węzła. Dodatkowo założymy, że w dowolnym momencie czasu w dowolnym węźle obliczeniowym naprawie może podlegać nie więcej niż jeden węzeł.

Dla dalszych rozważań przyjmiemy, że węzeł znajduje się w stanie  $k \in E$ ,  $E = \{0, 1, 2, \dots, N\}$  jeżeli w niej funkcjonuje  $k$  sprawnych. Dalej, w uzasadnionych przypadkach będziemy przyjmować, że  $k \in E$  jest także liczbą uszkodzonych. Jednak każdorazowo zostanie podana stosowna informacja. Oczywistym jest, że w przypadku odtwarzanego JSPO ( $m > 0$ ) z danego stanu możliwe są przejścia nie tylko do stanu  $i \leq k$ ,  $k \neq 0$ , ale także do stanu  $i > k$ ,  $k \neq N$ .

Moc systemu obliczeniowego jest wprost proporcjonalna do liczby sprawnych węzłów. Przykładowo, nominalna przepustowość systemu obliczeniowego, znajdującego się w stanie  $k \in E$  jest równa  $\Omega'(k) = k\omega'$ , gdzie  $\omega'$  to nominalna przepustowość węzła, tj. średnia liczba operacji obliczeniowych wykonywanych przez węzeł w przypadku pracy wyłącznie z pamięcią operacyjną.

Wydajność JSPO mierzona jest także efektywną i średnią efektywną przepustowością. Efektywna przepustowość systemu  $\Omega^*(k)$  znajdującej się w stanie  $k \in E$  jest równa liczbie wykonywanych przez nią w jednostce czasu standardowych operacji obliczeniowych. Standardową będziemy nazywać taką operację, z wykorzystaniem której można opisać wszystkie operacje, włączając w to operacje wejścia/wyjścia, odwołania się do sensorów pomiarowych, wymiany informacji węzłami sensorowymi i in. Efektywna przepustowość w oczywisty sposób zależy od zadań, które są rozwiązywane w JSPO. Efektywną wydajnością sprawnego węzła będziemy nazywać wielkość  $\omega^* = k^{-1}\Omega^*(k)$ .

Średnia efektywna przepustowość  $\Omega(k)$  JSPO znajdującego się w stanie  $k \in E$  może być określona wyrażeniem:

$$\Omega(k) = \left[ \sum_{i=1}^L \pi_i / \Omega_i^*(k) \right]^{-1}, \quad (14)$$

przy czym

$$\sum_{i=1}^L \pi_i = 1, \quad (15)$$

gdzie:  $\Omega_i^*(k)$  – efektywna przepustowość systemu przy rozwiązywaniu typowego zadania obliczeniowego  $I_i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, L\}$ ,  $\pi_i$  – waga zadania, proporcjonalna do czasu jego rozwiązania. Przy takich założeniach średnia efektywna przepustowość węzła będzie równa  $\omega = k^{-1}\Omega(k)$ .

Należy zwrócić uwagę, że zarówno efektywna jak również średnia efektywna przepustowość zależą od liczby węzłów w systemie, tj. od  $k \in E$ . Dana zależność wynika głównie ze zmiany względnych nakładów czasu niezbędnych do wykonania operacji systemowych (przy realizacji współdziałania maszyn) i operacji wymiany pomiędzy pamięcią masową i operacyjną każdego z węzłów. Jednakże przy spotykanych wartościach współczynników  $\lambda$  i  $\mu$  najbardziej prawdopodobnymi są stany, dla których liczba sprawnych jednostek jest zbliżona do  $N$ . Dlatego dla dostatecznie dużych wartości  $N$  zależność  $\omega^*$  i  $\omega$  od liczby sprawnych będzie nieznaczna. Dalej, jeżeli będzie mowa o wydajności węzłów pod tym pojęciem będziemy rozumieć jedną z poniższych wielkości:  $\omega'$ ,  $\omega^*$ ,  $\omega$ .

Poniżej określamy dwie najbardziej ogólne klasy JSPO: żywotne JSPO oraz systemy ze strukturalną nadmiarowością. Obie zaproponowane architektury różnią

się sposobem funkcjonalnego współdziałania pomiędzy węzłami przy ich uszkodzeniu oraz ich odtworzeniu.

Żywotnymi będziemy nazywać systemy obliczeniowe, których wydajność dla każdego stanu  $k \in E$  może być określona wzorem:

$$\Omega(k) = A_k \Delta(k-n) \varphi(k, \omega), \quad (16)$$

gdzie:  $A_k$  – współczynnik skalujący;  $n$  – wartość dolnej granicy (minimalna liczba sprawnych węzłów w systemie, przy której jej wydajność jest nie mniejsza od zadanej,  $n \neq 0, n \in E$ ),

$$\Delta(k-n) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } k \geq n, \\ 0, & \text{jeżeli } k < n, \end{cases} \quad (17)$$

$\omega$  – przepustowość elementarnej maszyny,  $\varphi(k, \omega)$  – niemalejąca funkcja, której argumentami są  $k$  i  $\omega$ , zazwyczaj  $\varphi(k, \omega) = k\omega$ .

Nieco uwagi poświęcimy wartości współczynnika skalującego  $A_k$ . Parametr ten określa możliwości zrównoleglenia programów wykonywanych w środowisku żywotnych systemów pomiarowo-obliczeniowych. Jak pokazuje doświadczenie znaczna część współczesnych zadań naukowo-technicznych może podlegać procesowi zrównoleglenia polegającemu na rozbięciu wykonywanego programu na zbiór równoległych gałęzi. Można zatem przyjąć, że dla analizowanego przypadku  $A_k \geq 1$ .

### 3.3. Reprezentacje grafów

#### 3.3.1. Podstawowe definicje teorii grafów

Teoria grafów jest dyscypliną naukową będącą częścią matematyki dyskretnej, zajmująca się analizą właściwości skończonych zbiorów z ściśle określonymi relacjami pomiędzy ich elementami. Jest ona szeroko wykorzystywana do opisu i badania różnorodnych systemów technicznych, biologicznych, ekonomicznych i społecznych. Podstawową definicją teorii jest określenie grafu, które może mieć poniższą postać.

#### Definicja 1

*Grafem nieskierowanym  $G = (V_G, E_G)$  nazywamy parę dwóch niepustych skończonych, rozłącznych zbiorów: zbioru  $V_G$ , nazywanego zbiorem wierzchołków grafu ( $V_G = \{v_{G_1}, v_{G_2}, \dots, v_{G_n}\}, n > 0$ ) oraz zbioru  $E_G$ , będącego zbiorem jego krawędzi ( $E_G = \{e_{G_1}, e_{G_2}, \dots, e_{G_m}\}, m > 0$ ), przy czym dla każdego  $i$ ,  $e_{G_i}$  jest parą elementów ze zbioru wierzchołków  $V_G$ .*

Powyższa definicja nie jest jedyną, w literaturze można znaleźć alternatywne określenia grafu [46], [47], [48], [49]. Pomiedzy elementami grafu, a komponentami modelowanego obiektu istnieje pewne przyporządkowanie. Dla przykładu, rozważmy połączenia sieci teleinformatycznej. Najczęściej, zbiór wierzchołków

grafu reprezentuje sobą zbiór jej węzłów, a zbiór krawędzi – zbiór kanałów komunikacyjnych modelowanej sieci. Do przedstawienia sieci teleinformatycznych szeroko wykorzystuje się opisane definicją 1 grafy nieskierowane. Jednak w wielu przypadkach model może pokazywać: ukierunkowanie działania sił, przepływu informacji, przemieszczania się mas, do czego lepiej jest wykorzystywać grafy skierowane. Przedstawione poniżej określenie grafu skierowanego jest rozwinięciem definicji grafu nieskierowanego. W dalszej części rozdziału rozważać będziemy grafy nieskierowane, a graf  $G$  będziemy nazywać grafem źródłowym.

## Definicja 2

*Grafem skierowanym  $G = (V_G, E_G)$  będziemy nazywać graf, którego każda krawędź  $e_G \in E_G$  jest uporządkowanym zbiorem wierzchołków.*

Podstawowym parametrem dowolnego grafu jest stopień, który możemy przypisać zarówno samej sieci, jak i dowolnemu z jej wierzchołków. Stopniem  $s_i^G$   $i$ -tego wierzchołka grafu  $G$ , będziemy nazywać liczbę krawędzi grafu, incydentnych do danego wierzchołka, stopniem  $s^G$  sieci będziemy nazywać maksymalny stopień jego wierzchołków.

## 3.4. Grafowa reprezentacja struktur niezależnych

Istnieje kilka alternatywnych sposobów zapisu grafu. Do najszerzej wykorzystywanych możemy zaliczyć zapis macierzowy oraz graficzny. *Zapis macierzowy* bazuje na przedstawieniu relacji pomiędzy wierzchołkami i krawędziami za pomocą macierzy (incydencji lub sąsiedztwa). Jest on wykorzystywany przez większość programów komputerowych, jednak okazuje się mało czytelny dla użytkownika. Do użytkowników, adresowany jest *zapis graficzny*, w którym zbiór  $V_G$  skojarzony jest z wierzchołkami grafu, a zbiór  $E_G$  z jego krawędziami. Graf  $G = (V_G, E_G)$ , oprócz zapisu tradycyjnego może zostać przedstawiony w dwóch innych postaciach: krawędziowej  $L(G)$  oraz wierzchołkowo-krawędziowej  $T(G)$ , nazywanej również grafem totalnym. Rozważmy krawędziowe  $L(G)$  przedstawienie grafu  $G$ , znajdujące szerokie wykorzystanie w badaniach żywotności OT.

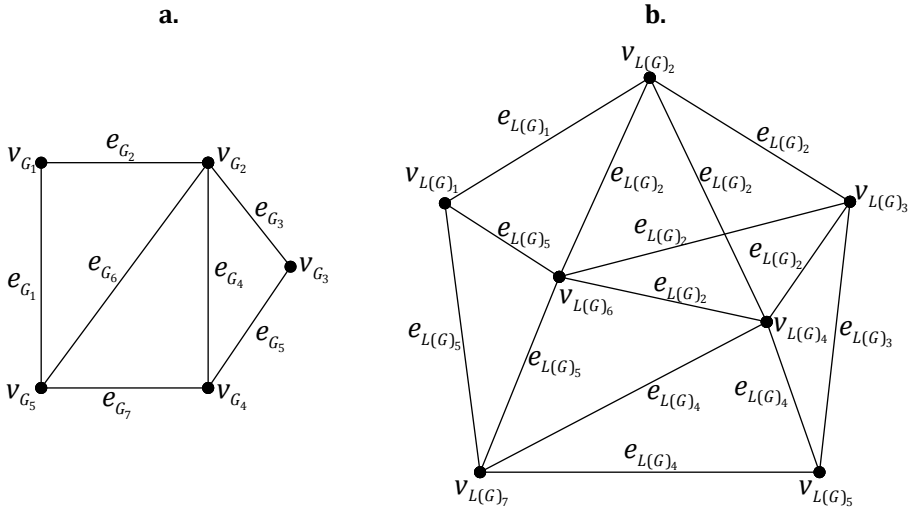
Niech  $V_{L(G)} = \{v_{L(G)_1}, v_{L(G)_2}, \dots, v_{L(G)_n}\}$  będzie zbiorem wierzchołków grafu krawędziowego  $L(G)$ , a  $E_G = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  zbiorem krawędzi grafu  $G$ . Wtedy graf krawędziowy  $L(G)$  można zdefiniować w poniższy sposób.

## Definicja 3

*Dla dowolnego grafu  $G$  graf krawędziowy  $L(G)$  to graf utworzony na podstawie  $G$ , spełniający następujące dwa warunki:*

1.  $V_{L(G)} = E_G$ ;
2. Wierzchołki  $v_{L(G)_i}$  i  $v_{L(G)_j}$  są sąsiednie w  $L(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy krawędzie  $e_{G_i}$  i  $e_{G_j}$  dla dowolnego  $i, j$  są sąsiednie w grafie  $G$ .

Na rys. 17a. przedstawiono graf źródłowy  $G$ , a na rys. 17b. jego reprezentację krawędziową  $L(G)$ .



Rys. 17. Graf źródłowy (a.) i jego reprezentacja krawędziowa (b.)

Postać krawędziowa jest szeroko wykorzystywana do analizy obiektów technicznych, o których sprawności decydują komponenty węzłowe a nie liniowe. Przykładem takiego obiektu są sieci komputerowe, wykorzystujące media przewodowe, o których dostępności decydują węzły, a nie kanały komunikacyjne.

Kolejnym przydatnym sposobem graficznego przedstawienia modelu OT jest *graf wierzchołkowo-krawędziowy* (totalny)  $T(G)$ . Wyróżniamy w nim dwa typy wierzchołków: wierzchołki-wierzchołki oraz wierzchołki-krawędzie. Może on zostać zdefiniowany w poniższy sposób.

**Definicja 4**

*Dla dowolnego grafu  $G$ , graf totalny  $T(G)$  to graf spełniający następujące warunki:*

1.
  - a. *Wierzchołki-wierzchołki grafu  $T(G)$  to wierzchołki będące również wierzchołkami w grafie  $G$ ;*
  - b. *Wierzchołki-krawędzie grafu  $T(G)$  to wierzchołki będące krawędziami w grafie  $G$ .*
2.
  - a.  $|V_{T(G)}| = |E_G| \cup |V_G|;$
  - b. *Wierzchołki-krawędzie  $e_{T(G)_i}$  oraz  $e_{T(G)_j}$  są sąsiednie w  $T(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy krawędzie  $e_{G_i}$  i  $e_{G_j}$  są sąsiednie w  $G$ ;*

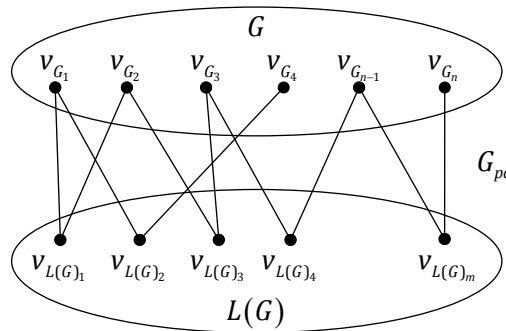
- c. Wierzchołki-wierzchołki  $v_{T(G)_i}$  oraz  $v_{T(G)_j}$  są sąsiednie w  $T(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy wierzchołki  $v_{G_i}$  i  $v_{G_j}$  są sąsiednie w  $G$ ;
- d. Wierzchołki-wierzchołki  $v_{T(G)_i}$  oraz  $v_{T(G)_j}$  są sąsiadami wierzchołka-krawędzi  $e_{T(G)_j}$  w  $T(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy wierzchołki  $v_{G_i}$  i  $v_{G_j}$  są przyległe do krawędzi  $e_{G_i}$  w  $G$ .

Do zrozumienia istoty grafu totalnego  $T(G)$ , przedstawimy go z wykorzystaniem grafu dwudzielnego  $G_{pq}$ , który opisuje poniższa definicja.

### Definicja 5

Grafem dwudzielnym nazywamy graf, w którym istnieje podział zbioru wierzchołków na dwie klasy, a zakończenia każdej krawędzi należą do różnych klas. Jeżeli dowolne dwa wierzchołki wchodzące w różne zbiory są sąsiednie to graf taki nazywa się zupełnym grafem dwudzielnym.

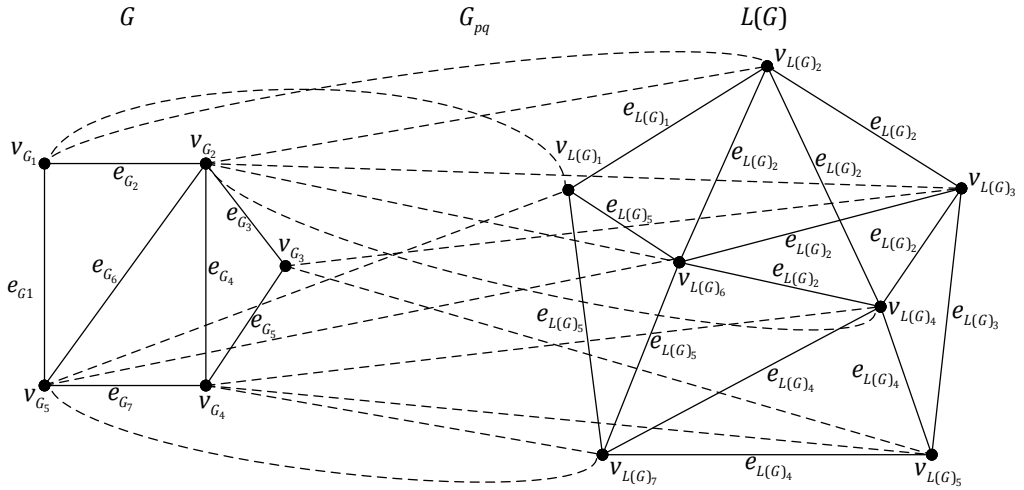
W celu zaprezentowania właściwości grafu totalnego, rozważmy graf  $G$  złożony z  $p$  wierzchołków oraz  $q$  krawędzi. Wykorzystując obie powyższe definicje można przedstawić go jako graf dwudzielny, łączący tradycyjną reprezentację grafu  $G$  z jego reprezentacją krawędziową  $L(G)$ , co pokazano schematycznie na rys. 18.  $G$  to graf źródłowy,  $L(G)$  – krawędziowy a  $G_{pq}$  – graf dwudzielny łączący oba grafy.



Rys. 18. Graf totalny jako graf dwudzielny

Graf  $G$  został przedstawiony, jako graf totalny  $T(G)$  na zamieszczonym poniżej rys. 19.





Rys. 19. Totalna reprezentacja grafu źródłowego

W celu powiązania stopni wierzchołków w tradycyjnej wierzchołkowej reprezentacji grafu  $G$  oraz zbudowanego na jego bazie grafu totalnego  $T(G)$ , wprowadzono dwa poniższe lematy.

**Lemat 1**

Stopień wierzchołka-wierzchołka  $v_{T(G)_i}$  w grafie totalnym  $T(G)$  jest równy sumie stopni krawędzi  $e_{G_1}, \dots, e_{G_m}$  grafu  $G$ , przyległych do wierzchołka  $v_{G_i}$ , tj.  $\deg v_{G(T)_i} = \sum_{j=1}^k \deg e_{G_j}$ , gdzie  $e_{G_j}$  - krawędź przyległa do wierzchołka  $v_{G_i}$  w grafie  $G$ ,  $1, \dots, k$  - numery kolejnych krawędzi przyległych do wierzchołka  $v_{G_i}$  w  $G$ . Dla wierzchołka-wierzchołka  $v_{T(G)_i}$  grafu  $T(G)$  prawdziwa jest nierówność  $\deg v_{T(G)_i} \geq 2 \deg v_{G_i}$ .

**Dowód.** Prawdziwość lematu wynika bezpośrednio z definicji grafu totalnego. ■

**Lemat 2**

Stopień wierzchołka-krawędzi  $e_{T(G)_i}$  w grafie totalnym  $T(G)$  jest równy sumie stopni wierzchołków  $v_{G_1}, \dots, v_{G_m}$  grafu  $G$ , przyległych do krawędzi  $e_{G_i}$ , tj.  $\deg e_{G(T)_i} = \sum_{j=1}^k \deg v_{G_j}$ , gdzie  $v_{G_j}$  - wierzchołek przyległy do krawędzi  $e_{G_i}$  w grafie  $G$ ,  $1, \dots, k$  - numery kolejnych wierzchołków przyległych do krawędzi  $e_{G_i}$  w  $G$ . Dla wierzchołka-krawędzi  $e_{T(G)_i}$  grafu  $T(G)$  prawdziwa jest nierówność  $\deg e_{T(G)_i} \geq 2 \deg e_{G_i}$ .

**Dowód.** Prawdziwość lematu wynika bezpośrednio z definicji grafu totalnego. ■

Na podstawie powyższych lematów można udowodnić poniższe twierdzenie.

### Twierdzenie 1

Jeżeli w grafie  $G$  wierzchołek  $v_{G_k}$  jest wierzchołkiem o najmniejszym stopniu to w grafie  $T(G)$ , wierzchołek-wierzchołek  $v_{T(G)_k}$  jest także wierzchołkiem o najmniejszym stopniu.

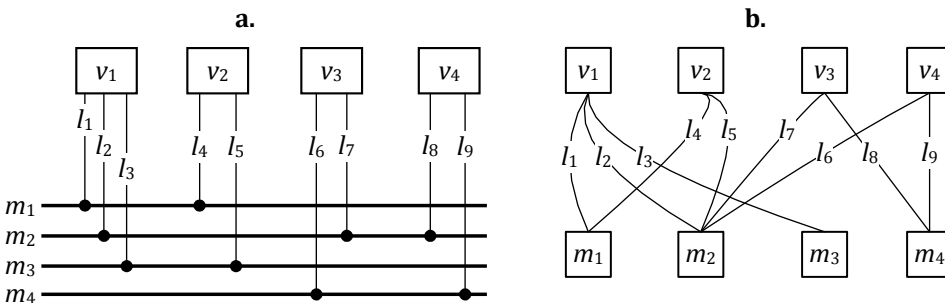
**Dowód.** Prawdziwość twierdzenia wynika bezpośrednio z obu poniższych lematów. ■

Modele obiektów technicznych wykorzystujące grafy totalne są używane do analizy dostępności sieci, w których awaryjne są ich wszystkie elementy, a także miejsca ich styku.

### 3.5. Grafowa reprezentacja struktur współdzielonych

Przykładem obiektu technicznego ze współdzielonymi elementami struktury mogą posłużyć sieci bezprzewodowe. W sieciach tych, medium transmisyjne, którym jest otaczająca przestrzeń, jest wykorzystywane przez wielu użytkowników. Graficzną reprezentację sieci bezprzewodowych można zastosować do rozwiązania większości zadań z nimi związanych, począwszy od analizy niezawodności, dostępności, odporności na uszkodzenia i żywotności, na analizie strumieni informacyjnych i ich rozptywie skończywszy. Dalej rozważać będziemy wielokanałową sieć bezprzewodową z rys. 20a., złożoną z 4 węzłów oraz 4 współdzielonych kanałów komunikacyjnych zwanych dalej magistralami.

Grafem PBL systemu magistralowego  $G$  zawierającego  $|V_G|$  węzłów,  $|E_G|$  magistral i zbiór linków  $K$  nazywamy dwudzielny graf  $G_{PBL}$ , który jest następującą parą  $(V_{G_{PBL}}, E_{G_{PBL}})$  i  $V_{G_{PBL}} = VV_{G_{PBL}} \cup VE_{G_{PBL}}$ , gdzie  $VV_{G_{PBL}} = V_G$  i  $VE_{G_{PBL}} = E_G$  oraz  $E_{G_{PBL}}$  reprezentuje połączenia w grafie  $G$  pomiędzy magistralami a węzłami. Węzły  $v_{G_{PBL}i}$  i  $v_{G_{PBL}j}$  są połączone przez krawędź  $e_{G_{PBL}m}$  wtedy i tylko wtedy, kiedy w źródłowym systemie magistralowym magistrala  $M_i$  jest połączona z węzłem  $W_j$  linkiem  $k_m$ . Graf ten został pokazany na rys. 20b.



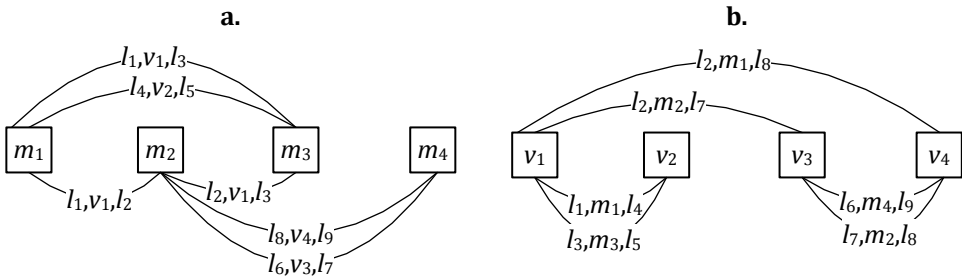
Rys. 20. Źródłowa sieć wielomagistralowa (a.) oraz jej reprezentacja PBL (b.)

Na podstawie grafu PBL można zbudować również inne formy reprezentacji współdzielonego grafu  $G$ , w szczególności postać: krawędziową, wierzchołkową, linkową, a także opisaną wcześniej wierzchołkowo-krawędziową (totalną).

Dla dowolnego grafu  $G_{PBL}$  graf krawędziowy  $L(G)$  opisywany jest za pomocą dwóch następujących warunków, będących modyfikacją poprzedniej definicji grafu krawędziowego:

1.  $V_{L(G)} = VE_{G_{PBL}}$ ;
2. Wierzchołki  $v_{L(G)_i}$  i  $v_{L(G)_j}$  są sąsiednie w  $L(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy wierzchołki-wierzchołki (magistrale)  $v_{G_{PBL}i}, v_{G_{PBL}j} \in VE_{G_{PBL}}$  są sąsiednie w grafie  $G_{PBL}$ .

Graf krawędziowy, jako reprezentacja źródłowego grafu magistralowego pokazano na rys. 21a.



Rys. 21. Reprezentacje źródłowego grafu magistralowego: graf krawędziowy  $L(G)$  (a.); graf wierzchołkowy  $N(G)$  (b.)

Dla dowolnego grafu  $G_{PBL}$ , graf wierzchołkowy  $N(G)$  opisywany jest za pomocą następujących dwóch warunków:

1.  $V_{N(G)} = VV_{G_{PBL}}$ ;
2. Wierzchołki  $v_{N(G)_i}$  i  $v_{N(G)_j}$  są sąsiednie w  $N(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy wierzchołki-krawędzie  $v_{G_{PBL}i}, v_{G_{PBL}j} \in VV_{G_{PBL}}$  są sąsiednie w  $G_{PBL}$ .

Graf krawędziowy  $N(G)$  jako reprezentację źródłowego grafu magistralowego pokazano na rys. 21b.

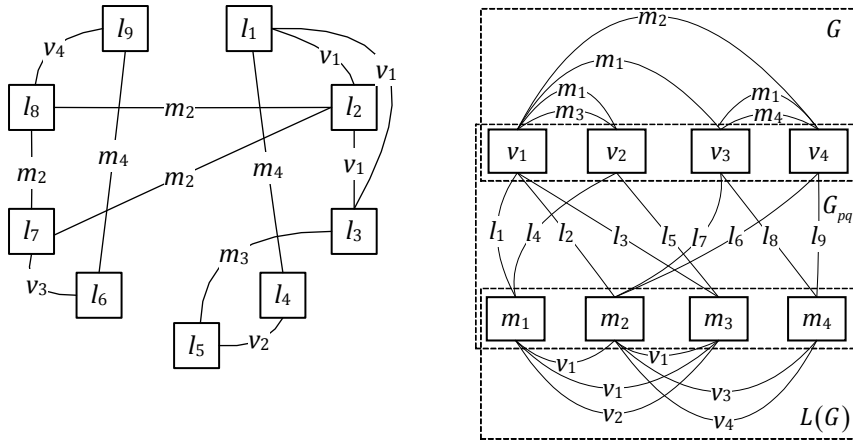
Dla dowolnego grafu  $G_{PBL}$ , graf linkowy  $Li(G)$  opisywany jest za pomocą dwóch następujących warunków:

1.  $V_{Li(G)} = E_{G_{PBL}}$ ;
2. Wierzchołki  $v_{Li(G)_i}$  i  $v_{Li(G)_j}$  są sąsiednie w  $Li(G)$  wtedy i tylko wtedy, kiedy krawędzie (linki)  $e_{G_{PBL}i}, e_{G_{PBL}j} \in E_{G_{PBL}}$  są sąsiednie w  $G_{PBL}$  przez wierzchołki ze zbiorów  $VE_{G_{PBL}}$  i  $VV_{G_{PBL}}$ .

Graf  $Li(G)$  linkowy jako reprezentację źródłowego grafu magistralowego  $G$  pokazano na rys. 22a.

a.

b.



Rys. 22. Reprezentacje magistralowego grafu źródłowego: graf linkowy  $Li(G)$  (a.); graf totalny  $T(G)$  (b.)

Graf totalny, będący alternatywną reprezentacją źródłowego grafu magistralowego pokazano na rys. 22b.

## ROZDZIAŁ 4

### Jedno- i wielokryterialne minimalne ścieżki w obiektach technicznych

#### 4.1. Wstęp

Jednymi z najważniejszych i najszerzej wykorzystywanych pojęć teorii grafów jest ścieżka. Znajdowanie minimalnej ścieżki było, obok budowy minimalnego drzewa rozpinającego, jednym z najwcześniejszych rozwiązanych zadań teorii grafów. Choć poszukiwanie minimalnej ścieżki kojarzy się zazwyczaj z analizą lub syntezą różnorodnych sieci transportowych, zakres jego praktycznego wykorzystania jest znacznie szerszy. Minimalne ścieżki można zastosować w procesie planowania działań ratunkowych, podejmowanych po wystąpieniu zjawisk o charakterze katastroficznym, organizacji produkcji, optymalizacji zatrudnienia itp. Oparta na nich formalizacja procesu decyzyjnego gwarantuje lepsze wykorzystanie posiadanego potencjału ludzkiego i sprzętowego. Wyszukiwanie minimalnych ścieżek można zastosować także do określania wskaźników żywotności obiektów technicznych (OT), logistyce, optymalizacji algorytmów i in.

Pomimo szerokiego asortymentu algorytmów rozwiązujących zadania wyszukiwania minimalnej ścieżki, brakuje dogłębnej analizy określającej obszar efektywnego wykorzystania każdego z nich, szczególnie w przypadku modelowania złożonych OT. Ponadto, znane algorytmy dokonują wyszukiwania jednokryterialnego, podczas gdy w analizie OT o jej wyborze decyduje wiele różnych charakterystyk. Dlatego, w ramach prowadzonych badań, opracowano i przetestowano nowe algorytmy wielokryterialne, przeznaczone do zastosowania w analizie złożonych obiektów technicznych.

#### 4.2. Jednokryterialne wyszukiwanie najkrótszej ścieżki w grafie-modelu

##### 4.2.1. Podstawowe definicje i charakterystyki grafu-modelu

W niniejszym rozdziale, rozważane będą pojęcia drogi, ścieżki, cyklu oraz odległości w grafie. Poniżej przedstawiono ich definicje, wywodzące się bezpośrednio z teorii grafów [51], [50], [46], [52].

##### Definicja 6

*Droga w grafie to skończony ciąg występujących na przemian wierzchołków i krawędzi postaci  $a = v_0, e_1, v_1, e_2, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n = b$  taki, że  $e_i = \{v_{i-1}, v_i\}$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Wierzchołki  $a$  oraz  $b$  nazywamy końcami drogi.*

### Definicja 7

*Ścieżką nazywamy drogę, której wszystkie krawędzie są różne, liczba krawędzi nazywana jest długością ścieżki. Jeżeli wszystkie wierzchołki ścieżki są różne to ścieżka nazywana jest ścieżką elementarną, w przeciwnym przypadku złożoną.*

### Definicja 8

*Cyklem nazywamy ścieżkę, której pierwszy i ostatni wierzchołek są identyczne. Jeżeli wszystkie wierzchołki cyklu, oprócz końcowych są różne to cykl nazywany jest cyklem elementarnym, w przeciwnym przypadku mówimy, że jest to cykl złożony.*

### Definicja 9

*Odległość  $d_{v,u}$  pomiędzy wierzchołkami  $v$  oraz  $u$  to długość najkrótszej ścieżki pomiędzy wierzchołkami  $v$  oraz  $u$ .*

Do poszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie opracowano i zweryfikowano wiele algorytmów, różniących się zarówno przeznaczeniem, a także złożonością czasową i pamięciową. Do najszerzej wykorzystywanych można zaliczyć algorytmy: Dijkstry, Dijkstry-Gribova, Levita, Forda-Bellmana, Jena, Floyda-Warshalla oraz Johnsona [51], [50], [47], [53], [54], [55], [56], [57]. Analizę ich złożoności czasowej oraz przydatności do rozwiązywania zadań z obszaru badania rozbudowanych OT przedstawiono w §4.3.

Jeżeli analizowanym obiektem będzie złożona sieć teleinformatyczna, na wybór konkretnego algorytmu wpływa nie tylko kryterium doboru krawędzi ścieżki, ale również struktura grafu-modelu opisującego sieć. Przyjmijmy, że jego wierzchołki odpowiadają będą jej węzłom, a krawędzie – kanałom komunikacyjnym. Aby ukierunkować procedurę doboru algorytmu, poniżej przedstawiono cechy szczególne grafu opisującego sieć teleinformatyczną. W szczególności, należy zauważyć że:

1. Graf zawierający węzły końcowe (komputery użytkowników) posiada znaczną liczbę wierzchołków połączonych rzadką siecią kanałów komunikacyjnych. Jeżeli  $n$  to liczba wierzchołków grafu, a  $m$  ilość jego krawędzi to ma miejsce zależność:  $m \ll n(n - 1)/2$ . Oznacza to, że liczba krawędzi grafu jest wielokrotnie mniejsza od ich ilości w grafie zupełnym. Jeżeli jednak analizowany model nie zawiera jednostek użytkownika, graf ma niewielkie rozmiary, a jego sieć połączeń jest umiarkowanie gęsta;
2. Jeżeli analizowany graf opisuje strukturę fizyczną sieci to jego dolne poziomy (sieci dostępowe) są drzewami, a rdzeń jest umiarkowanie gęsty;
3. Ponieważ łączność w analizowanych systemach jest dwukierunkowa, a każdy z kanałów komunikacyjnych posiada ściśle określone, najczęściej symetryczne parametry to sieć ta może być przedstawiona za pomocą grafu nieskierowanego z wielokrotnymi wagami. Jeżeli kanały są asymetryczne to do opisu sieci należy zastosować podobne grafy skierowane;

4. Jeżeli przewiduje się długotrwałe przeciążenie kanałów, graf może posiadać krawędzie o ujemnych wagach. W przeciwnym przypadku, krawędzie takie nie powinny być stosowane;
5. W modelu sieci bezprzewodowych dla połączenia węzła końcowego ze stacją bazową, żadna z wykorzystywanych do tego celu krawędzi nie powinna być narzucona odgórnie. Dla połączeń w rdzeniu sieci, w celu zapewnienia efektywnego wykorzystania istniejącej infrastruktury, niewielka część spośród krawędzi może być określona obligatoryjnie;
6. Jeżeli do dowolnego poziomu rzeczywistej sieci, pomijając najniższy, dodany zostanie kanał komunikacyjny, to dodanie do grafu-modelu odpowiadającej mu krawędzi, wymaga ponownego określenia parametrów pozostałych krawędzi grafu. Włączenie do sieci dodatkowego węzła, zawsze implikuje dodanie do niej kanału komunikacyjnego (patrz pkt. 7);
7. Graf-model musi być spójny. Dlatego, jeżeli wykorzystywane kanały nie łączą wszystkich węzłów sieci, grafu-model może nie zawierać odpowiadających im wierzchołków;
8. W trakcie funkcjonowania sieci, określone wcześniej minimalne ścieżki mogą być modyfikowane. Dlatego, oprócz zestawu minimalnych ścieżek łączących dowolną parę wierzchołków, projektantowi niezbędna jest znajomość architektury samej sieci i zachodzących w niej zmian;
9. Ponieważ tworzone ścieżki mają różne przeznaczenie, waga krawędzi grafu powinna być opisana za pomocą kilku wybranych parametrów, opisujących ją z punktu widzenia konkretnego zadania projektowego.

Podobne, aczkolwiek nieidentyczne cechy można przypisać dowolnemu obiektowi złożonemu z części węzłowej i liniowej. Wykorzystując powyższe ustalenia, dokonamy analizy krytycznej znanych algorytmów poszukiwania najkrótszych ścieżek.

### 4.3. Algorytmy poszukiwania najkrótszych ścieżek

Po wstępnej analizie uwzględniającej wymagania przedstawione w §4.2.1, jako podstawę do dalszych rozważań wytypowano zaprezentowane niżej algorytmy. Ich dokładny opis można znaleźć w literaturze [51], [50], [47], [53], [54], [55], [56], [57].

*Algorytm Dijkstry* określa najkrótsze ścieżki łączące wybrany wierzchołek ze wszystkimi wierzchołkami grafu. Funkcjonuje on poprawnie wyłącznie dla grafów, w których nie występują krawędzie z ujemną wagą. W trakcie funkcjonowania wykorzystuje on trzy zbiory:  $M_0$  – zawierający wierzchołki, do których odległość została już wyznaczona lub znajduje się na etapie określenia;  $M_1$  z wierzchołkami, do których odległość jest właśnie wyznaczana oraz  $M_2$  grupujący wierzchołki, odległość do których nie została jeszcze wyliczona. W najprostszym przypadku, złożo-

ność algorytmu dla grafu  $G$  wynosi  $O(n^2 + m)$ . Efektywność metody zależy od sposobu wyszukiwania w zbiorze  $M_1$  wierzchołka z minimalną, bieżącą odległością do węzła źródłowego [51], [50], [48], [47].

Zaproponowana przez *Gribova* modyfikacja algorytmu, polega na rozbiciu zbioru wierzchołków na podzbiory zawierające bliskie sobie elementy. Najkrótsze ścieżki łączące je z zadany węzłem, różnią się o odległość mniejszą niż długość minimalnego łuku grafu wykorzystywanego w danym kroku algorytmu. W każdej kolejnej iteracji algorytm wykorzystuje niepusty podzbiór, odpowiadający minimalnej wartości odległości [53], [48].

*Algorytm Levita* poszukuje zbioru najkrótszych ścieżek łączących zadany wierzchołek ze wszystkimi pozostałymi węzłami grafu. Swoim funkcjonowaniem przypomina on algorytm Dijkstry, podobnie jak on wykorzystuje trzy zbiory  $M_0, M_1, M_2$ . Wierzchołki tworzące zbiór  $M_1$  dzielone są pomiędzy dwoma kolejkami: podstawową i priorytetową. Każdemu z wierzchołków, przypisywana jest nieujemna długość najkrótszej ścieżki, określanej spośród znanych na chwilę obecną, a prowadzących z wierzchołka źródłowego do danego. Niestety, w algorytmie tym wybrane węzły przetwarzane są wielokrotnie, co zwiększa jego złożoność czasową. Z drugiej jednak strony, sposoby włączania i wyłączania wierzchołków *do* lub *ze* zbioru  $M_1$  są prostsze, co skutkuje obniżeniem tejże złożoności. Przeprowadzone badania pokazały, że dla sieci z nieregularną strukturą i realnymi odległościami pomiędzy węzłami, algorytm Levita zapewnia największą szybkość spośród wszystkich znanych algorytmów. Minimalna jest również jego złożoność pamięciowa. Ponadto, w odróżnieniu od algorytmu Dijkstry zapewnia on obsługę krawędzi z ujemnymi wagami. Złożoność czasową algorytmu szacuje wyrażenie  $O(nm)$  [57], [58], [59], [53].

Kolejny algorytm – *Bellmana-Forda* – rozwiązuje zadanie znajdowania najkrótszych ścieżek łączących wskazany węzeł z wszystkimi pozostałymi wierzchołkami grafu, dopuszczając przy tym ujemne wagi jego łuków. Podobnie jak w algorytmie Dijkstry, opiera się on na sekwencyjnej relaksacji krawędzi, prowadzonej aż do momentu określenia najkrótszej ścieżki. Algorytm sprawdza dodatkowo istnienie cykli z ujemną wagą, osiągalnych z danego wierzchołka. Jeżeli w badanym grafie cykle takie nie istnieją, algorytm znajduje najkrótsze ścieżki pomiędzy zadany węzeł a wszystkimi pozostałymi wierzchołkami grafu. W przeciwnym przypadku, przynajmniej dla ograniczonej grupy wierzchołków, ścieżki takie nie istnieją. Złożoność czasowa całego algorytmu wynosi  $O(nm)$ , w tym złożoność inicjalizacji jest szacowana jako  $O(n)$ , a sprawdzenia istnienia cyklu z ujemną wagą  $O(m)$  [51], [48], [60], [59].

*Algorytm Jena* przeznaczony jest do wyszukiwania w grafie z nieujemnymi wagami zbioru  $k$  ścieżek z minimalną sumaryczną długością, łączących wskazaną parę węzłów. Charakteryzuje go złożoność czasowa rzędu  $O(n^2)$ . Zakłada on, że znana jest metoda znajdowania w grafie najkrótszej ścieżki pomiędzy daną parą



wierzchołków. Przez cały czas funkcjonowania algorytmu, budowana jest lista pretendentów tworzących najkrótsze ścieżki. Algorytm rozpoczyna działanie od znalezienia pierwszej najkrótszej ścieżki. Ponieważ wszystkie kolejne nie powinny pokrywać się z pierwszą, muszą się one różnić od niej przynajmniej jedną krawędzią. Dlatego, z grafu  $G$  kolejno usuwa się po jednej krawędzi wchodzącej w skład otrzymanej wcześniej ścieżki. Dla uzyskanych w ten sposób grafów ponownie poszukiwana jest najkrótsza z nich. Otrzymane ścieżki oznaczane są za pomocą usuniętej krawędzi i zostają umieszczone na liście pretendentów. Po zakończeniu powyższej procedury, z listy pretendentów wybierana jest najkrótsza ścieżka. Następna w kolejności najkrótsza ścieżka jest określana analogicznie. W rezultacie, do listy pretendentów dopisujemy  $k$  nowych ścieżek, zazwyczaj  $k \ll N$ . W celu usprawnienia funkcjonowania algorytmu, poszukiwanie ścieżki po usunięciu jednej z krawędzi prowadzone jest jednocześnie z jej obu końców, przy czym używa się do tego drzew rozpinających, otrzymanych dla grafu źródłowego [48], [61], [62], [63].

*Algorytm Johnsona* przeznaczony jest do określania najkrótszych ścieżek pomiędzy dowolnymi dwoma wierzchołkami grafu skierowanego i został oparty na idei zmiany wag jego krawędzi. Przyjmijmy, że dla krawędzi grafu  $G$  można zaproponować funkcję zmieniającą ich wagi, zapewniającą ich nieujemność i pozostawiającą niezmiennymi utworzone wcześniej najkrótsze ścieżki (tj. składają się one z tych samych krawędzi). Wtedy, zadanie poszukiwania najkrótszych ścieżek pomiędzy wszystkimi parami węzłów w grafie zawierającym krawędzie z ujemnymi wagami, w którym jednak nie istnieją ujemne cykle, można rozwiązać za pomocą algorytmu Dijkstry, wykorzystywanego niezależnie dla każdego z wierzchołków. Jeżeli do tego celu zastosujemy kopce Fibonacciego, rozwiązanie zadania charakteryzuje złożoność czasowa rzędu  $O(n^2 \log(n) + nm)$ . W algorytmie tym można wydzielić dwa elementarne działania: dodawanie wierzchołków oraz zmiana wag krawędzi. Pierwsze z nich, dodając fikcyjny wierzchołek, jednocześnie łączy go krawędziami o zerowej wadze ze wszystkimi pozostałymi wierzchołkami grafu. Następnie, za pomocą algorytmu Bellmana-Forda, dla każdego węzła  $i$  określa się wartość funkcji  $P(i)$ , będącej długością najkrótszej ścieżki łączącej fikcyjny wierzchołek z dowolnym innym wierzchołkiem. Jako funkcję zmiany wag krawędzi najczęściej wykorzystuje się ruch w kanałach tworzonych przez krawędzie grafu [53], [64], [65], [66].

*Algorytm Floyda-Warshalla* zaliczymy do grupy dynamicznych algorytmów poszukiwania najkrótszych ścieżek pomiędzy wszystkimi parami wierzchołków grafu skierowanego. Istotną zaletą algorytmu jest prostota realizacji w postaci programu komputerowego, bez względu na wykorzystywany język. Złożoność czasowa algorytmu ma postać  $O(n^3)$ . Choć algorytm ten efektywnie buduje ścieżki pomiędzy wszystkimi parami wierzchołków to nie zachowuje on informacji o najkrótszych spośród nich [48], [63], [46], [52].

Przejdźmy obecnie do analizy przydatności wyszczególnionych wyżej algorytmów. Z dalszych rozważań, bezsprzecznie można wyłączyć algorytm Jena, który

przeznaczony jest do poszukiwania ścieżek o długości równej najkrótszej z nich. W rozwiązywanym zadaniu nie mamy gwarancji, że istnieje więcej niż jedna ścieżka o minimalnej długości. Algorytm Johnsona jest efektywny wyłącznie dla grafów rzadkich. Ponieważ w dalszych rozważaniach zakładamy, że wykorzystywać będziemy zarówno grafy rzadkie jak i umiarkowanie gęste, jego przydatność jest ograniczona. Charakterystyki algorytmu Dijkstry są w znacznym stopniu zależne od sposobu wyszukiwania węzłów, które dzieli minimalna bieżąca odległość. Efektywności uważanych za optymalne algorytmów Dijkstry-Gribova oraz Levita są porównywalne. Dla zadań o charakterze geograficznym, drugi z algorytmów charakteryzują lepsze parametry. W przypadku poszukiwania ścieżek wyrównujących obciążenia, lepszymi właściwościami charakteryzuje się pierwszy z algorytmów. W odróżnieniu od metody Dijkstry w algorytmie Levita, niektóre spośród wierzchołków przetwarzane są wielokrotnie, jednak do zarządzania zbiorem wierzchołków  $V$  (dodawania i usuwania elementów) wykorzystywane są prostsze metody.

Badania pokazały, że dla tzw. grafów geograficznych, odzwierciedlających strukturę sieci transportowych z rzeczywistymi odległościami, algorytm Levita okazuje się najszybszy. W rozważanym zadaniu, graf źródłowy nie jest jednak tworzony bezpośrednio w oparciu o sieć komunikacyjną, krawędzie z ujemnymi wagami nie występują, a ich waga określana jest nie tylko na podstawie odległości pomiędzy wierzchołkami. Dlatego, algorytm ten, w stosunku do algorytmu Dijkstry nie posiada żadnych istotnych zalet. Niejednoznaczności oceny pojawiają się również przy wykorzystaniu algorytmu Dijkstry-Gribova. W rozwiązywanym zadaniu wagi krawędzi mogą być znaczne, a różnice w wagach niewielkie. W rezultacie, do jednej grupy trafia wiele, a nawet wszystkie wierzchołki, na skutek czego podział węzłów może okazać się nieefektywny.

Powyższa analiza pokazuje, że przy budowie minimalnych ścieżek grafowego modelu OT należy oprzeć się na algorytmie Dijkstry, w szczególności na jego modyfikacjach zmniejszających złożoność obliczeniową.

#### **4.4. Wielokryterialne poszukiwanie ścieżek komunikacyjnych**

W niniejszym paragrafie, w charakterze obiektu technicznego, nadal będziemy wykorzystywać sieć teleinformatyczną, złożoną z węzłów wyposażonych w urządzenia sieciowe z własną mocą obliczeniową oraz pasywne kanały komunikacyjne. W ogólnym przypadku, zadanie poszukiwania optymalnej ścieżki w takim OT to poszukiwanie sekwencji kanałów i węzłów tworzących trasę najlepszą względem pewnego wskazanego kryterium bądź ich zestawu. Wymaga ono rozwiązania dwóch powiązanych ze sobą podzadań:

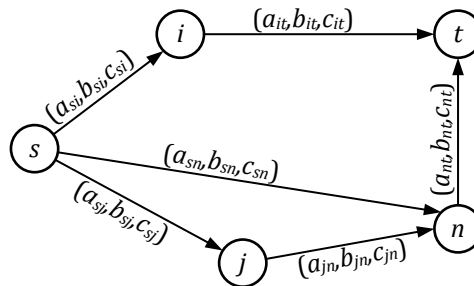
1. Określenia zbioru kryteriów doboru trasy;
2. Wyboru metody jej budowy.

Dobór elementów minimalnych ścieżek może być jedno- lub wielokryterialny. Z uwagi na konieczność minimalizacji opóźnień w budowie ścieżki oraz ograniczoną

moc obliczeniową urządzeń sieciowych, najczęściej wykorzystuje się prostszą obliczeniowo metodę jednokryterialną. W tej klasie algorytmów zakłada się, że jeden z parametrów ścieżki to kryterium wyszukiwania rozwiązania, pozostałe zaś są ograniczeniami. W tradycyjnych sieciach z niezmienną topologią, kryterium tym jest zazwyczaj opóźnienie transmisji pakietów, które utożsamia się z długością ścieżki komunikacyjnej. Dla innych OT, mogą to być przemieszczane w systemie masy, objętości, energie itp. W takich przypadkach, budowa najkrótszej ścieżki może okazać się kłopotliwym w rozwiązaniu problemem NP-zupełnym.

Dla wielokomórkowych sieci bezprzewodowych, poszukiwanie najkrótszej ścieżki jest znacznie bardziej złożone. Po pierwsze, rozmiary sieci zmieniają się w dużo większym zakresie, niż miało to miejsce dla stacjonarnych sieci przewodowych. Po drugie, budowane są różne typy ścieżek, w szczególności specyficzne w wykorzystaniu ścieżki przemieszczania obciążeń. W rezultacie, liczba wykorzystywanych niezależnych kryteriów i ograniczeń znacznie rośnie. Po trzecie, jednokryterialna synteza ścieżki nie zawsze pozwala uzyskać satysfakcjonujące rozwiązanie. Dlatego, dla każdego z kryteriów lub ich zestawu, należy zagwarantować istnienie efektywnego, skalowalnego algorytmu wyszukiwania ścieżki, którego złożoność powinna rosnać wolniej niż rozmiary sieci. Zastosowane kryteria, muszą uwzględniać podstawowe charakterystyki komunikacyjne sieci, a wymagania dotyczące granicznych poziomów jakości obsługi być skorelowane z ograniczeniami wartości parametrów kanałów. Z drugiej strony, kryteria wykorzystywane przy projektowaniu ścieżek powinny wypuklać te spośród parametrów, które stanowią przedmiot zainteresowania użytkownika i zależą od samej sieci.

Rozważmy przedstawiony na rys. 23 grafowy model OT, w którym oprócz topologii połączeń, określono charakterystyki kanałów komunikacyjnych.



Rys. 23. Grafowy model obiektu technicznego

Terminem *stan kanału połączeniowego* będziemy określać zestaw charakterystyk określających jego właściwości. Na rys. 23 określamy nim trójkę zmiennych  $(a, b, c)$ , opisujących, na przykład, przepustowość  $a$ , opóźnienie  $b$  oraz stopień błędów  $c$ . Informacja o parametrach kanałów, może być przechowywana w każdym węźle końcowym, może być również zlokalizowana w specjalnej stacji zarządzają-

cej, dostępnej wszystkim sprzętowym komponentom sieci. Pojęciem *trasa dopuszczalna*, określać będziemy ścieżkę spełniającą wszystkie wymagania jakościowe dotyczące obsługi komunikacyjnej.

W odróżnieniu od rozpatrywanych dotąd, model z rys. 23 to skierowany graf ważony  $G = (V, E)$ , gdzie:  $V$  - zbiór jego wierzchołków odpowiadających węzłom sieci,  $|V| = m$ ;  $E$  - zbiór łuków odpowiadających kanałom połączeniowym,  $|E| = m$ . *Symetrycznym* nazywać będziemy kanał złożony z dwóch łuków o przeciwnym kierunku i identycznych parametrach komunikacyjnych. W szczególnym przypadku, kiedy wszystkie kanały są symetryczne, do projektowania możemy zastosować prostsze algorytmicznie i obliczeniowo ważne grafy nieskierowane.

Nie ulega wątpliwości, że zastosowanie metody wielokryterialnej prowadzi do uzyskania sieci o lepszych parametrach komunikacyjnych. Nie oznacza to jednak rezygnacji z metody jednokryterialnej. Jeżeli liczba kanałów wchodzących w skład ścieżki jest znaczna, a sama sieć złożona, zastosowanie wyszukiwania wielokryterialnego, w którym parametry każdej ze ścieżek będą występować jawnie, z obliczeniowego punktu widzenia jest bardzo trudne. Celem prowadzonych badań jest opracowanie szybkich i skutecznych metod walki z zagrożeniami technicznym. Wyszukiwanie wielokryterialne może być procesem długotrwałym, przez co jego przydatność do rozwiązywania stojących zadań jest ograniczona do obszaru zagrożeń wolnozmiennych. Z drugiej jednak strony, wykorzystanie wyłącznie jednego kryterium może okazać się niesatysfakcjonujące. Po pierwsze, do utworzenia akceptowalnej ścieżki, konieczne może być uwzględnienie nie jednego, a kilku parametrów kanału lub trasy komunikacyjnej. Po drugie, procedura projektowania może wymagać uwzględnienia charakterystyk kilku kanałów tworzących ścieżkę. Dlatego, pojedyncze kryterium  $W$  oceny ścieżki, powinno być utworzone na bazie kryteriów cząstkowych  $w_1, \dots, w_l$ , opisujących poszczególne parametry kanału lub ich zbioru.

Dla ilustracji metody wielokryterialnej, wykorzystamy przykład z rys. 23. Sposoby przełożenia ocen cząstkowych na ocenę końcową dzielimy na trzy typy: addytywne, multiplikatywne oraz wklęsłe. Dalej, rozważać będziemy ścieżkę postaci  $P = i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow \dots \rightarrow s \rightarrow t$ , której kryteria oceny kanałów oznaczymy odpowiednio:  $w(i, j), w(j, k), \dots, w(s, t)$ . Ocena końcowa  $W(P)$  ścieżki będzie addytywna jeżeli:

$$W(P) = w(i, j) + w(j, k) + \dots + w(s, t), \quad (18)$$

multiplikatywna w przypadku, kiedy:

$$W(P) = w(i, j) \cdot w(j, k) \cdot \dots \cdot w(s, t), \quad (19)$$

a wklęsła, jeśli:

$$W(P) = \min(w(i, j), w(j, k), \dots, w(s, t)). \quad (20)$$

Parametr  $w(i, j)$  opisujący charakterystyki  $(i, j)$ -ego kanału komunikacyjnego może być jedną z wielkości wyszczególnionych w opisie rys. 23. Może być on również addytywnym, multiplikatywnym lub wklęsłym zwinieniem kilku wielkości.

Ponieważ poszukiwanie minimalnych ścieżek jest zadaniem najczęściej rozwiązywanym w ramach opisywanych badań, opracowano metodę poszukiwania w grafie-modelu OT rozwiązań suboptymalnych, dla obiektów złożonych z homogenicznych regionów, na przykład, wielokomórkowych sieci bezprzewodowych. Rozważmy definicję zadania wielokryterialnego poszukiwania ścieżki w grafie skierowanym  $G = (V, E)$ , będącym modelem hierarchicznego OT. Przyjmijmy, że  $R^+$ , to zbiór dodatnich liczb rzeczywistych, a  $I$  jest zbiorem dodatnich liczb całkowitych. Dalej, analizować będziemy ścieżkę, której wierzchołek  $s$  będzie źródłem, a  $t$  przeznaczeniem. Trasę opisywać będą dwie funkcje kosztów:  $w_1: E \rightarrow R^+$  oraz  $w_2: E \rightarrow R^+$ , których znaczenie zostało ograniczone odpowiednio stałymi:  $B \in R^+$  dla  $w_1$  oraz  $D \in R^+$  dla  $w_2$ . Zadanie  $WKPS(G, s, t, w_1, w_2, B, D)$  wielokryterialnego poszukiwania ścieżki w grafie  $G$ , polega na określeniu możliwej do zrealizowania trasy  $P$ , łączącej wierzchołek  $s$  z  $t$ , spełniającej warunki  $w_1(P) \geq B$  oraz  $w_2(P) \leq D$ . Jeżeli taka trasa nie istnieje, zadanie  $WKPS$  nie posiada rozwiązania.

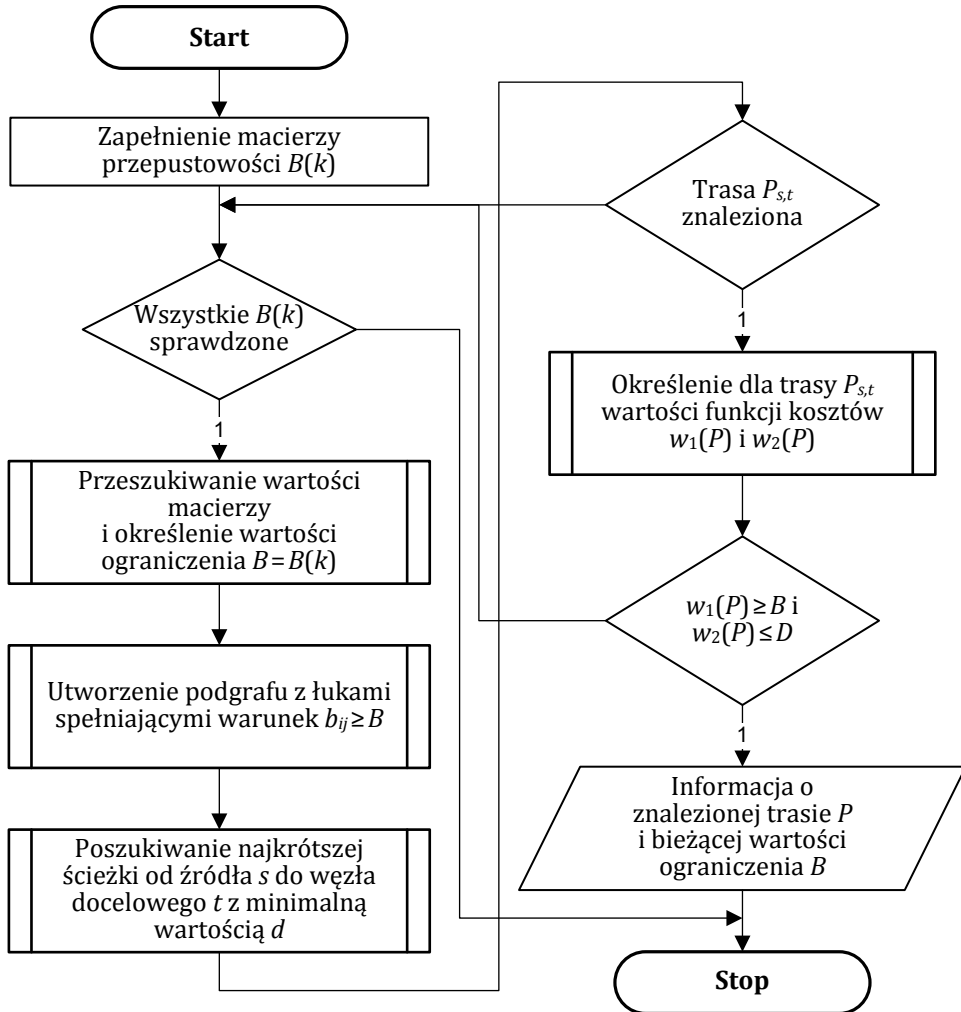
Przeanalizujemy ścieżkę  $P = v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow \dots \rightarrow v_k$ , dla której funkcje  $w_1(P)$  oraz  $w_2(P)$  określane są odpowiednio:

$$w_1(P) = \min(w_1(v_{i-1}, v_i)), \text{ dla } i=0, \dots, i, \quad (21)$$

$$w_2(P) = \sum_{i=1}^k w_2(v_{i-1}, v_i). \quad (22)$$

Pierwsze z kryteriów jest wypukłe, drugie zaś addytywne. Kryteria  $w_1(P)$  oraz  $w_2(P)$  mogą odpowiednio opisywać przepustowość ścieżki  $P$ , ograniczoną wartością  $B$  oraz jej opóźnienie komunikacyjne ograniczone znaczeniem  $D$ . Trasę  $P$  spełniającą ograniczenia  $w_1(P) \geq B$  oraz  $w_2(P) \leq D$  nazywamy rozwiązaniem zadania  $WKSP(G, s, t, w_1, w_2, B, D)$ .

Procedura projektowania ścieżki została schematycznie przedstawiona na schemacie blokowym z rys. 24. Podobnie jak wcześniej, przyjęto że kryterium  $w_1$  będzie odzwierciedlać przepustowość, zaś  $w_2$  opóźnienie. Jej danymi wejściowymi są: zbiór  $V$  wierzchołków grafu-modelu  $G$ ; zbiór  $E$  jego krawędzi; wierzchołek źródłowy  $s$ ; wierzchołek docelowy  $t$ , stałe  $D$  i  $B$  występujące w roli ograniczeń projektowania oraz przepustowości dostępnych kanałów komunikacyjnych.



Rys. 24. Rozwiązanie zadania wielokryterialnego poszukiwania ścieżki

Procedura składa się z trzech podstawowych komponentów, realizujących określoną zamkniętą funkcję. Pierwszy z nich, wykorzystując wypukłość ograniczenia na przepustowość ścieżki, buduje podgraf  $H$  grafu  $G$ , zawierający wyłącznie krawędzie posiadające minimalną, wymaganą przepustowość. Dzięki temu, z procedury są eliminowane krawędzie niespełniające warunku przepustowości, analizowana jest mniejsza ilość wariantów rozwiązania i poszukiwana ścieżka otrzymywana jest w krótszym czasie. W tym celu, dla grafu  $G$  określana jest dwuwymiarowa macierz  $B_{m \times 2} = (b_i, u_i)$ , gdzie:  $b_i$  – przepustowość  $i$ -tego kanału komunikacyjnego,  $i = 1, \dots, m$ ;  $m = |E|$ ,  $u_i$  – współczynnik określany w dalszej części procedury,  $u_i = \{0,1\}$ . Następnie, iteracyjnie sprawdza możliwość budowy ścieżki: jeżeli cho-

ciażby jedna z krawędzi grafu  $G$  posiada przepustowość większą od zadanego ograniczenia, procedura budowy ścieżki jest kontynuowana. W przeciwnym przypadku jest ona przerywana i podawana jest informacja, że ścieżka o zadanych parametrach nie może być utworzona. Dalej, w macierzy  $B(k, u)$  wyszukuje się krawędzie spełniające ograniczenie przepustowości ścieżki, opisując je wartością  $u_i = 1$ , dla pozostałych  $u_i = 0$ . W oparciu o zawartość  $B(k, u)$  buduje się podgraf  $H$  grafu  $G$ , utworzony wyłącznie przez krawędzie spełniające wymagane przepustowości ścieżki.

Drugi etap procedury to budowa ścieżki o minimalnym koszcie pomiędzy źródłem  $s$  a przeznaczeniem  $t$ . Do tego celu można zastosować dowolny z przedstawionych wcześniej algorytmów, w analizowanym przypadku zastosowanie znajduje algorytm Dijkstry. Utworzenie ścieżki kończy drugi etap procedury. Jeżeli wymagana ścieżka nie zostanie utworzona, modyfikuje się ograniczenia na przepustowość, buduje nowy podgraf  $H$  i ponownie poszukuje się ścieżki.

Trzeci etap procedury, sprawdza spełnienie przez utworzoną ścieżkę warunków  $w_1$  oraz  $w_2$ . Jeżeli są one wypełnione, procedura kończy swoje działanie, w przeciwnym przypadku poszukiwanie ścieżki jest powtarzane.

W niektórych zastosowaniach, może pojawić się potrzeba projektowania ścieżki w oparciu o trzy kryteria. Rozwiązania podobnych zadań są znane, jednak charakteryzują się wysoką złożonością czasową. Dlatego zaproponowano metodę, w której rozwiązanie zadania z trzema kryteriami, sprowadza się do rozwiązania zadania dwukryterialnego. Dzięki temu, poszukiwanie ścieżki odbywa się kosztem tylko nieznacznego zwiększenia złożoności czasowej. W tym celu wykorzystuje się mieszaną funkcję wagową  $u_{(i,j)}$ .

Z uwagi na specyfikę analizowanych obiektów technicznych, jednym z najczęściej wykorzystywanych kryteriów oceny kanału komunikacyjnego jest prawdopodobieństwo utraty pakietu. Ponieważ rozpatrywana sieć powinna gwarantować dostawę informacji do odbiorcy, w protokoły komunikacyjne zostały wbudowane mechanizmy powtarzania transmisji pakietów, które nie zostały dostarczone do węzła przeznaczenia. Skutkiem powtórnej transmisji jest pojawienie się dodatkowego opóźnienia  $m_{(i,j)}$ , określanego wyrażeniem:

$$m_{(i,j)} = g d_{(i,j)}, \quad (23)$$

gdzie:  $g$  – współczynnik proporcjonalności, zależny od wykorzystywanego protokołu komunikacyjnego;  $d_{(i,j)}$  – średnie opóźnienie kanału komunikacyjnego  $(i, j)$ . Wykorzystując wyrażenie (23), funkcję wagi  $u_{(i,j)}$  możemy przedstawić jako:

$$u_{(i,j)} = d_{(i,j)} + s_{(i,j)} m_{(i,j)} = d_{(i,j)} + s_{(i,j)} g d_{(i,j)} = d_{(i,j)} (1 + s_{(i,j)} g),$$

gdzie:  $s_{(i,j)}$  – współczynnik utraty pakietów w kanale  $(i, j)$ .

Jeżeli do określenia funkcji  $u$  dla ścieżki  $P$  wykorzystamy addytywną zasadę aglomeracji, to będzie miała ona postać:

$$U(P) = \sum_{i=1}^k u(v_{i-1}, v_i) \quad (24)$$

Dzięki temu, rozwiązanie zadania projektowego z trzema kryteriami może być zrealizowane z wykorzystaniem algorytmu przedstawionego na rys. 24.

#### 4.5. Zmienność parametrów kanałów komunikacyjnych

Współczesne sieci rozległe są z definicji heterogeniczne komunikacyjnie. Dlatego, w ich rdzeniu mogą być szeroko stosowane dwupunktowe technologie transmisyjne. Możliwość ich zestawienia posiada wiele spośród wykorzystywanych obecnie technologii, które oferują szybką budowę bezpośrednich połączeń logicznych pomiędzy dowolną parą węzłów. W odniesieniu do rdzenia sieci dedykowane kanały dwupunktowe są bardzo atrakcyjnym rozwiązaniem, pozwalającym elastycznie dostosowywać strukturę jego połączeń do aktualnego wzorca ruchu. Jednak ich praktyczne wykorzystanie charakteryzuje się ograniczoną efektywnością. Po pierwsze, w systemach z wysoką dynamiką zmian charakterystyk ruchu, krótkotrwałe zastosowanie dedykowanej struktury połączeń może być nieopłacalne – czas ich zestawienia nierzadko jest porównywalny z czasem trwania ruchu o specyficznych charakterystykach. W takim przypadku, korzystniejszym niż rekonfiguracja okazuje się przysposobienie sieci do pracy w trybie chwilowego przeciążenia. Po drugie, kanały komunikacyjne, w szczególności w sieciach bezprzewodowych, charakteryzuje wysoka niestabilność większości parametrów. Najczęściej jest ona konsekwencją zmian charakterystyk obsługiwanego ruchu oraz właściwości otoczenia (zanieczyszczenie środowiska, niekorzystne warunki pogodowe, konkurowanie o dostęp do kanału).

Rekonfiguracja jako reakcja na zmianę wzorca ruchu ma ograniczone zastosowanie. Jest ona jednak skutecznym narzędziem rozwiązania problemów niestabilności charakterystyk kanałów komunikacyjnych. Ponieważ to właśnie kanały tworzą analizowane ścieżki, znaczącą niestabilnością parametrów charakteryzują się również te ostatnie. Aby zapewnić stabilne funkcjonowanie ścieżek utworzonych za pomocą zaproponowanych algorytmów, w algorytmach ich projektowania zastosowano dodatkowe parametry opisujące zmienność wybranych charakterystyk. Tak więc, zmianę przepustowości  $b_{(i,j)}$  kanału komunikacyjnego oznaczymy  $\Delta b_{(i,j)}$ , zmianę opóźnienia  $d_{(i,j)}$  jako  $\Delta d_{(i,j)}$ . Parametry te, podobnie jak ich pierwotne wzory, określane są dla każdego z analizowanych sieciowych kanałów komunikacyjnych.

Zmienność właściwości w czasie wymaga okresowej aktualizacji ich wartości, która powinna być wykonywana jednocześnie w całej sieci. Jako aktywizujące kryterium aktualizacji wykorzystamy czas. Wartość parametru zmienności przepustowości kanału przed aktualizacją oznaczymy symbolem  $\Delta b_{(i,j)}^1$ , a po aktualizacji  $\Delta b_{(i,j)}^2$ . Identyczną zasadę oznaczania wykorzystamy również do określenia warto-



ści przepustowości, którą przedstawimy symbolami:  $b_{(i,j)}^1$  – wartość przepustowości przed aktualizacją oraz  $b_{(i,j)}^2$  – wartość po aktualizacji. Podobnie oznaczać będziemy ewolucję opóźnień oraz ich wartości:  $\Delta d_{(i,j)}^1$  – zmiana opóźnienia w kanale  $(i, j)$  przed aktualizacją;  $\Delta d_{(i,j)}^2$  – zmiana opóźnienia po aktualizacji;  $b_{(i,j)}^1$  – wartość opóźnienia w kanale  $(i, j)$  przed aktualizacją;  $b_{(i,j)}^2$  – wartość opóźnienia po aktualizacji.

Dysponując informacjami o stanie kanału komunikacyjnego, na podstawie formuł analitycznych charakterystycznych dla każdego protokołu, można prosto oszacować wartości przepustowości  $b_{(i,j)}$  oraz opóźnień  $d_{(i,j)}$ . Z kolei współczynniki zmian parametru określamy, jako różnicę poprzedniego i obecnego znaczenia danej charakterystyki w sieci. Przypuśćmy, że w analizowanej sieci wykorzystywany będzie protokół TCP. Wtedy do określenia wartości  $\Delta b_{(i,j)}$  można skorzystać z wyrażenia otrzymanego poprzez modyfikację wzoru Jacobsona:

$$\Delta b_{(i,j)}^2 = k\Delta b_{(i,j)}^1 + (1-k)|b_{(i,j)}^2 - b_{(i,j)}^1|, \quad (25)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik stabilności informacji historycznej, określający jak szybko z procedury usuwana jest informacja o wartości zmiennej  $\Delta b_{(i,j)}^1$ ,  $k < 1$ , wartość  $(1 - k)$  opisuje jak szybko  $\Delta b_{(i,j)}^2$  zdąża do wartości  $|b_{(i,j)}^2 - b_{(i,j)}^1|$ . Bazując na analogicznych rozważaniach, otrzymujemy wyrażenie służące do określania wartości  $\Delta d_{(i,j)}^2$  zmiany opóźnienia:

$$\Delta d_{(i,j)}^2 = k\Delta d_{(i,j)}^1 + (1-k)|d_{(i,j)}^2 - d_{(i,j)}^1|. \quad (26)$$

Jak pokazały przeprowadzone badania, powyższe zasady uwzględniania zmian parametrów mogą być prosto uogólnione na inne typy obiektów technicznych.

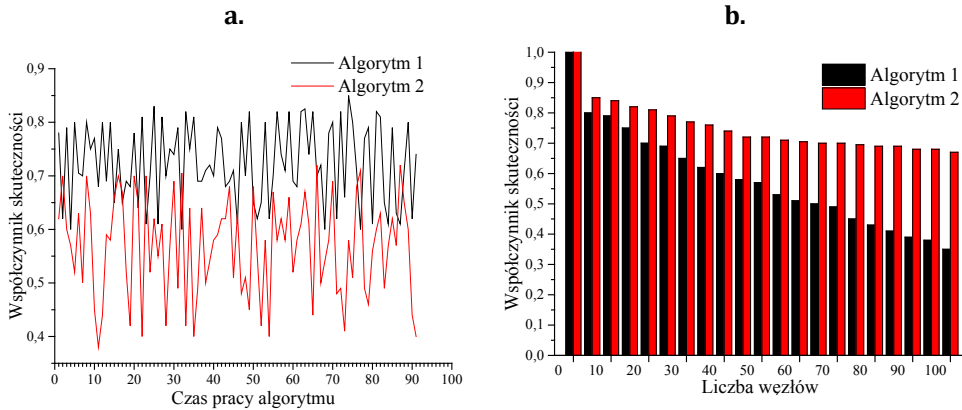
#### 4.6. Analityczne badania algorytmów

W ramach badań analitycznych skoncentrowano się na porównaniu zaproponowanego algorytmu z klasycznymi metodami wielokryterialnego poszukiwania ścieżek. W tym celu, opracowany algorytm (dalej Algorytm 1) porównano z klasycznym podejściem (Algorytm 2), w którym ścieżka tworzona jest sekwencyjnie, kolejno dla każdego z ograniczeń, w danym przypadku – trzech. Na początku, tradycyjny algorytm określa ścieżkę charakteryzującą się minimalnym opóźnieniem, łączącą węzły źródłowy i docelowy. Następnie, jeżeli utworzono kilka ścieżek, spośród nich wybierana jest ta z maksymalną przepustowością. Jeżeli w rezultacie wykonania drugiego kroku, ponownie uzyskano kilka ścieżek, wybierana jest ta charakteryzująca się minimalnym współczynnikiem błędów.

Jako kryterium oceny rozwiązania, wykorzystano współczynnik skuteczności, określający udział pakietów poprawnie przesłanych po sieci w ich ogólnej liczbie. W eksperymencie założono, że pakiety wysyłane są przez węzeł źródłowy perma-

nentnie, a ich utrata to przede wszystkim konsekwencja czasu niezbędnego na zestawienie ścieżki. Ponadto, wpływ na współczynnik skuteczności ma niemożność zestawienia ścieżki z zadanymi parametrami. W takim przypadku, zgodnie z zaproponowaną procedurą wymagania dotyczące jakości ścieżki są rozluźniane, a procedura jej budowy powtarzana.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów zostały zaprezentowane na rys. 25. Pierwszy z wykresów (rys. 25a.) ilustruje zmianę współczynnika skuteczności w sieci złożonej z 1000 węzłów z losowym generowaniem parametrów kanałów oraz końcowych węzłów ścieżki. Żądania zestawiania i usuwania ścieżek są zgłaszane tak, aby obciążenia kanałów były nie mniejsze niż 60% ich przepustowości. Drugi z wykresów (rys. 25b.) pokazuje uśrednioną skuteczność dla różnych rozmiarów sieci i stałego obciążenia. Wyniki eksperymentów pokazują, że zastosowanie zaproponowanej metody poprawia współczynnik skuteczności średnio o 15-17%.



Rys. 25. Wyniki badań analitycznych

## ROZDZIAŁ 5

### Minimalizacja złożoności pamięciowej grafowych modeli obiektów technicznych

#### 5.1. Wstęp

Oprócz szeregu zalet wykorzystania teorii grafów do modelowania obiektów technicznych, rozwiązanie to posiada również istotne wady. Jedną z najważniejszych jest znacząca złożoność pamięciowa wykorzystywanych metod analizy grafu-modelu. Bez względu na rodzaj opisywanego obiektu technicznego, grafy-modele charakteryzuje niski stopień wierzchołków, przez co efektywność ich macierzowej reprezentacji jest niewysoka. Wykorzystywane modele grafowe zalicza się do grupy grafów rzadkich, w których liczba  $l_e$  krawędzi spełnia zależność  $l_e \ll n(n-1)/2$ . Zastosowanie zapisu macierzowego do ich reprezentacji, wskazane jest ze względu na wymagania komputerowych metod modelowania – właśnie dla tego typu zapisu modelu, efektywność ich działania jest najwyższa [27], [28].

Metoda opiera się na wykorzystaniu właściwości grafów przecięć kodowych, pozwalających kodować węzły grafu-modelu. W rezultacie, tworzona jest jednolita przestrzeń informacyjna (kodowa), w której obszarze możliwe jest zastosowanie wirtualnych procedur analizy i syntezy.

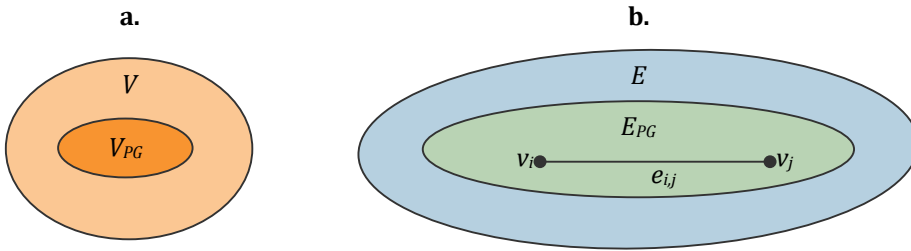
#### 5.2. Podstawowe definicje

Rozważać będziemy skierowane skończone grafy  $G = (V, E)$ , gdzie:  $V$  – zbiór wierzchołków grafu,  $|V| = n$ ;  $E$  – zbiór jego łuków,  $|E| = m$ . Łuk grafu łączący wierzchołki  $v_i$  oraz  $v_j$  ( $v_i, v_j \in V$ ) będziemy oznaczać  $e_{i,j}$  ( $e_{i,j} \in E$ ) lub alternatywnie, wykorzystując numery wierzchołków ( $v_i, v_j$ ). Najważniejszymi pojęciami wykorzystywanymi w dalszej części rozdziału są: podgraf, podgraf indukowany oraz nadgraf, których definicje prezentujemy poniżej. W określonych przypadkach wykorzystywać będziemy również grafy nieskierowane [67], [68], [69], [70], [48].

#### Definicja 10

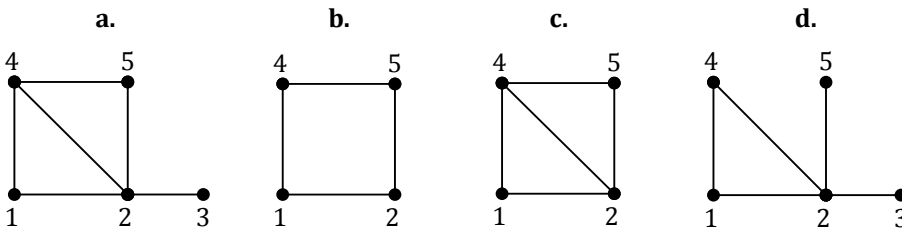
*Podgrafem grafu  $G = (V, E)$  będziemy nazywać graf  $G_{PG} = (V_{PG}, E_{PG})$ , dla którego zbiorem wierzchołków  $V_{PG}$  jest podzbiór wierzchołków  $V$  grafu  $G$ , tj.  $V_{PG} \subseteq V$ , a zbiór krawędzi (łuków) jest podzbiorem zbioru  $E$  jego krawędzi (łuków), tj.  $E_{PG} \subseteq E$ . Przy tym, jeżeli  $(v_i, v_j) \in E$  oraz  $v_i, v_j \in V_{PG}$  to obowiązkowo  $(v_i, v_j) \in E_{PG}$ .*

Powyższe określenie nazywane jest *silną* definicją podgrafu i z punktu widzenia relacji pomiędzy zbiorami wierzchołków oraz krawędzi  $G$  i  $G_{PG}$  zostało przedstawione graficznie na rys. 26.



Rys. 26. Graf i jego podgrafy: a. Graf  $G = (V, E)$ ; b. Podgraf  $G_{PG} = (V_{PG}, E_{PG})$  grafu  $G$ .

Rozważmy nieskierowany graf  $G_{IG}$ , indukowany zbiorem wierzchołków [68]. Niech  $V_{IG}$  ( $V_{IG} \subset V$ ) oznacza wierzchołkowy zbiór indukujący, równy zbiorowi wierzchołków grafu indukowanego  $G_{IG}$ . Jego zbiór  $E_{IG}$  krawędzi pokrywa się ze zbiorem  $E$  wszystkich krawędzi grafu  $G$ , których końce należą do zbioru  $V_{IG}$ . Wtedy graf  $G_{IG}$  nazywa się grafem indukowanym zbiorem wierzchołków  $V_{IG}$ . W przykładzie z rys. 27, grafy z rysunków b. i c. są podgrafami indukowanymi grafu z rysunku a.



Rys. 27. Graf i jego podgrafy

Znane są również podgrafy indukowane zbiorem krawędzi [70]. Jeżeli krawędziowy zbiór indukujący  $E_{IG}$  ( $E_{ID} \subseteq E$ ) grafu  $G_{IG}$  pokrywa się ze zbiorem jego krawędzi, a zbiór  $V_{IG}$  jego wierzchołków ze zbiorem końców krawędzi ze zbioru  $E_{ID}$ , to taki graf nazywa się podgrafem indukowanym zbiorem krawędzi  $E_{IG}$ . Istotnym pojęciem jest również graf częściowy nazywany także częścią grafu [49].

### Definicja 11

*Grafem częściowym zadanego grafu  $G = (V, E)$  będziemy nazywać graf  $G_{CG} = (V_{CG}, E_{CG})$ , którego zbiór wierzchołków  $V_{CG}$  i zbiór wierzchołków grafu  $G$  są równe, tj.:  $V_{CG} = V$ , a zbiór  $E_{CG}$  jego krawędzi jest podzbiorem zbioru krawędzi (łuków) grafu  $G$ , tj.  $E_{CG} \subseteq E$ . Innymi słowy grafem częściowym grafu  $G$  jest graf  $G_{CG}$  utworzony przez krawędzie grafu  $G$ .*

W przykładzie z rys. 27d. przedstawiono graf częściowy grafu z rys. 27a. W najprostszym przypadku można przyjąć, że jeżeli graf  $G_1$  jest podgrafem grafu  $G$ , to graf  $G$  jest nadgrafem grafu  $G_1$ . Pojęcie nadgrafu dokładniej określa poniższa definicja.

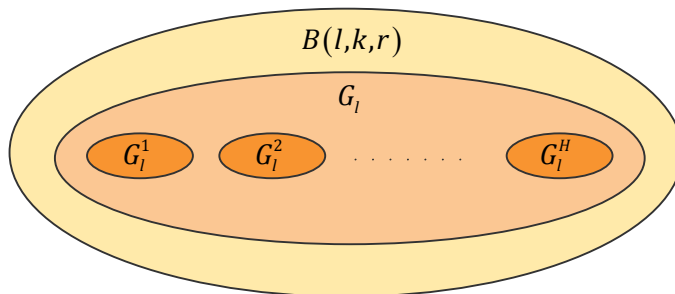
## Definicja 12

Nadgrafem  $G_{NG} = (V_{NG}, E_{NG})$  grafu  $G = (V, E)$  będziemy nazywać graf, dla którego spełnione są relacje:  $V \subset V_{NG}$ ,  $E \subset E_{NG}$ .

Nadgraf, określany jest również terminem supergrafu [70] chociaż część autorów uważa te pojęcia za różne [48]. Zależności pomiędzy zbiorami wierzchołków i krawędzi obu grafów można przeanalizować wykorzystując rys. 26. Wszystkie powyższe definicje można uogólnić na grafy skierowane [52], [71].

### 5.3. Definicja zadania badawczego

Celem badań jest stworzenie efektywnej metody przechowywania macierzowego opisu hierarchicznego obiektu technicznego. Za przykład takiego systemu może posłużyć system teleinformatyczny wykorzystujący zwielokrotnienie kanałów komunikacyjnych, wydzielające w kanałach fizycznych zbiór niezależnych kanałów logicznych. W celu maksymalizacji współczynnika wykorzystania kanałów logicznych, stosowane są wieloskokowe ścieżki logiczne, będące podstawą budowy topologii logicznych. Metoda zapisu powinna umożliwić przechowywanie dowolnej liczby topologii logicznych, w pełni autonomicznych lub powiązanych pomiędzy sobą za pośrednictwem węzłów fizycznych. Do rozwiązania zadania proponuje się zbudować spójny nadgraf, izomorficzny dowolnym sieciom logicznym, będący podgrafem grafu de Bruijna. Wykorzystanie grafu de Bruijna lub innego grafu nad alfabetem wynika z potrzeby efektywnego zapisu w pamięci komputera macierzowej reprezentacji zbioru grafów. Istota proponowanej metody została przedstawiona graficznie na rys. 28. Opracowana metoda może być wykorzystywana do opisu większości analizowanych obiektów technicznych.



Rys. 28. Idea metody przechowywania zbioru sieci logicznych

W celu określenia formalnej definicji zadania oraz sposobów jego rozwiązania rozważmy spójny nieskierowany skończony graf  $G_f = (V_f, E_f)$  sieci fizycznej, gdzie:  $V_f$  – zbiór węzłów fizycznych (wierzchołków grafu),  $|V_f| = n_f$ ;  $E_f$  – zbiór fizycznych kanałów komunikacyjnych (krawędzi grafu),  $|E_f| = m_f$ . Załóżmy, że w oparciu o sieć fizyczną  $G_f$  zbudowanych zostało  $H$  różnych sieci logicznych, opisa-

nych za pomocą grafów skierowanych postaci  $G_l^h = (V_l^h, E_l^h)$ , gdzie:  $V_l^h$  – zbiór węzłów  $h$ -tej topologii logicznej (wierzchołków grafu),  $|V_l^h| = n_l^h$ ;  $E_l^h$  – zbiór skierowanych kanałów komunikacyjnych (łuków grafu) o mocy  $m_l^h$ ,  $h = 1, \dots, H$ .

Wykorzystując powyższe oznaczenia, można założyć że budowa spójnego skierowanego izomorficznego nadgrafu  $G_l$ , obejmującego zbiór sieci logicznych  $\{G_l^h\}$ ,  $h = 1, \dots, H$  polega na stworzeniu grafu, którego zbiór  $V_l$  wierzchołków opisuje wyrażenie:

$$V_l = \bigcup_{h=1}^H V_l^h, \quad (27)$$

a zbiór łuków:

$$E_l \supseteq \bigcup_{h=1}^H E_l^h. \quad (28)$$

Z kolei nadgraf  $G_l$  ma być podgrafem grafu de Bruijna  $B(l, k, r)$ , co oznacza:

$$\bigcup_{h=1}^H G_l^h(V_l^h, E_l^h) \cong G_l(V_l, E_l) \subseteq B(l, k, r) \quad (29)$$

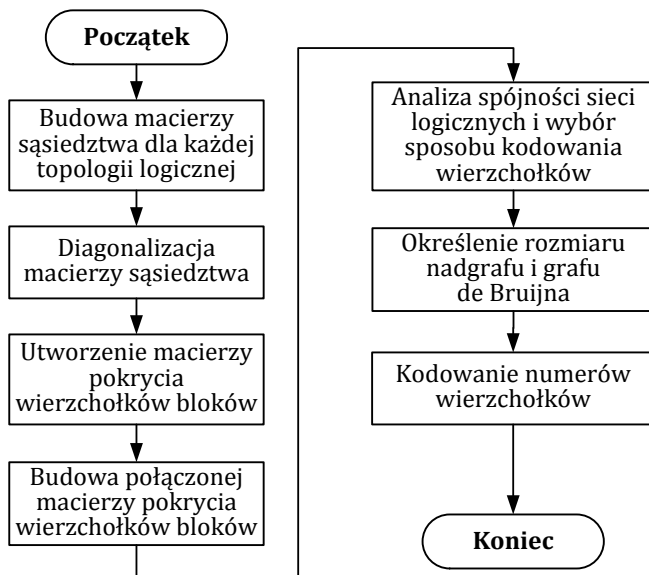
Zgodnie z opisem w [72], sieci logiczne tworzą węzły i kanały logiczne, wykorzystujące zasoby sieci fizycznej. Węzły logiczne budowane są w oparciu o zasoby węzłów fizycznych, kanały logiczne – kanałów fizycznych. W praktyce, pojawiają się powiązane sieci logiczne, rozłączne względem odpowiadających im zasobów fizycznych, tj.  $V_f^h \cap V_f^i = \emptyset$ , gdzie:  $V_f^h, V_f^i$  – zbiór węzłów fizycznych, odpowiednio  $h$ -tej oraz  $i$ -tej sieci logicznej;  $h, i = 1, \dots, H$ ,  $h \neq i$ . Oznacza to, że do ich połączenia i zapewnienia komunikacji pomiędzy nimi, konieczne będzie zastosowanie mostów. Dalej, mostem będziemy nazywać krawędź grafu (w danym przypadku skierowany kanał komunikacyjny), którego usunięcie zwiększa liczbę komponentów spójności grafu [sieci] [70].

Niech  $M_l$  oznacza zbiór łuków logicznych, łączących wierzchołki logiczne rozłącznych sieci logicznych, dodatkowo  $M_l = E_l \setminus \bigcup_{h=1}^H E_l^h$ . Wtedy,  $M_l$  jest uzupełnieniem zbioru  $E_l$  łuków nadgrafu sieci logicznych, a wyrażenie (29) można przedstawić w postaci:

$$\bigcup_{h=1}^H G_l^h(V_l^h, E_l^h) \cup M_l \cong G_l(V_l, E_l) \subseteq B(l, k, r) \quad (30)$$

Jeżeli sieci logiczne mają wspólne węzły fizyczne to zbiór  $M_l$  może być zbiorem pustym. Taka sytuacja w praktyce spotykana jest najczęściej.

Kolejne kroki rozwiązania zadania przedstawione zostały na rys. 29.



Rys. 29. Kroki procedury zapisu zbioru topologii logicznych w grafie de Bruijna

Budowa blokowo-diagonalnej macierzy  $A_{t_b-d}^h$  sąsiedztwa każdej z sieci logicznych  $G_t^h$ , może być zrealizowana za pomocą procedury przedstawionej w [73]. Do tego celu można wykorzystać również dowolną procedurę przekształcenia macierzy do postaci blokowo-diagonalnej [74], [75]. Analizę spójności sieci logicznych można wykonać za pomocą zmodyfikowanych metod badania spójności grafów [76]. Wymagane modyfikacje dotyczą przede wszystkim wykorzystywanych struktur danych. Określenie rozmiaru grafu de Bruijna oraz kodowanie jego wierzchołków opisano w dalszej części rozdziału.

#### 5.4. Procedura budowy blokowo-diagonalnej macierzy sąsiedztwa

Rozważmy sieć połączeniową  $t$ , opisaną za pomocą grafu skierowanego  $G_t = (V_t, E_t)$ , gdzie:  $V_t$  – zbiór wierzchołków grafu,  $|V_t| = n_t$ ;  $E_t$  – zbiór łuków,  $|E_t| = m_t$ . Macierz blokowo-diagonalna opisująca graf  $G_t$  będzie macierzą kwadratową o rozmiarze  $n_t \times n_t$ . Budowę jej oprzemy na podziale zbioru  $V_t$  wierzchołków grafu na rozłączne podzbiory. Każdy ze zbiorów w blokowo-diagonalnej macierzy sąsiedztwa tworzyć będzie niepusty blok, którego elementy przyjmują wartości 0 lub 1. Pozostałe bloki, niewchodzące w skład przekątnej posiadają wyłącznie zerowe elementy. Procedura została oparta na przestawianiu w macierzy sąsiedztwa wierszy oraz kolumn, wykonywanym już po podziale jej elementów na rozłączne zbiory.

Procedura budowy blokowo-diagonalnej macierzy sąsiedztwa wykorzystuje podział zbioru  $V_t$  wierzchołków grafu  $G_t$  na rozłączne podzbiory. W tym celu, w macierzy sąsiedztwa  $A_t$  wybieramy dowolny wiersz, odpowiadający wierzchołkowi

$v_i^t \in V_t$ . Następnie, określamy wszystkie kolumny macierzy  $A_t$  sąsiedztwa, dla których w punkcie przecięcia ze wskazanym wierszem występują elementy o wartości 1 (zgodnie z definicją macierzy sąsiedztwa [68], poszukujemy par wierzchołków powiązanych ze sobą łukiem). Dalej, dla analizowanego wierzchołka  $v_i^t$  określamy zbiór  $\{v_i^t\}^{in}$  wierzchołków, do których dochodzą łuki wychodzące ze wskazanego wierzchołka i analizujemy kolumny odpowiadające wierzchołkom ze zbioru  $\{v_i^t\}^{in}$ . W kolejnym kroku, określamy wszystkie wiersze, na przecięciu których z określonymi wcześniej kolumnami pojawiają się wartości 1. Na podstawie zbioru  $\{v_i^t\}^{in}$  tworzymy nowy zbiór  $\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}$ . Dalej, analizujemy wiersze, odpowiadające wierzchołkom ze zbioru  $\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}$ . Określamy wszystkie kolumny, na przecięciu których z określonymi wcześniej wierszami rozmieszczone są wartości 1. Dla zbioru  $\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}$  określamy nowy zbiór  $\{\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}\}^{in}$ . Opisaną powyżej procedurę kontynuujemy do momentu, kiedy określane zbiory nie będą się powtarzać. W ten sposób, po jej zakończeniu, określone zostaną zbiory  $V_{1m}^t$  wierzchołków, z których wychodzą łuki skierowane wyłącznie do wierzchołków ze zbioru  $V_{m1}^t$ . W ogólnym przypadku, zbiory te będą posiadały postać:

$$V_{lm}^t = v_i^t \cup \{\{v_i^t\}^{in}\}^{out} \cup \{\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}\}^{in}\}^{out} \cup \dots \cup \{\{\dots\{v_i^t\}^{in}\}^{out} \dots\}^{in}\}^{out}, \quad (31)$$

$$V_{ml}^t = \{v_i^t\}^{in} \cup \{\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}\}^{in}\}^{out} \cup \{\{\{\{\{v_i^t\}^{in}\}^{out}\}^{in}\}^{out}\}^{in}\}^{out}\}^{out} \cup \dots \cup \{\{\{\dots\{v_i^t\}^{in}\}^{out} \dots\}^{in}\}^{out}\}^{in} \cup \dots \cup \{\{\{\{\dots\{v_i^t\}^{in}\}^{out} \dots\}^{in}\}^{out}\}^{in}\}^{out}\}^{in}. \quad (32)$$

Wraz z utworzeniem zbiorów  $V_{1m}^t$  oraz  $V_{m1}^t$  kończy się pierwszy krok algorytmu. Jeżeli  $V_{1m}^t \neq V_t$  to w kolejnym jego kroku ( $l = 2$ ), jako  $v_i^t$  wybieramy wierzchołek  $v_i^t \in V_t \setminus V_{1m}^t$  i dla niego na podstawie wyrażeń (31) oraz (32) określamy zbiory  $V_{2m}^t$  oraz  $V_{m2}^t$ . Jeżeli  $V_{1m}^t \cup V_{2m}^t \neq V_t$ , działania te wykonujemy ponownie. Po wykonaniu  $p$  kroków ( $0 < p < n_t$ ) spełniony jest warunek:  $\bigcup_{l=1}^p V_{lm}^t = V_t$  i procedura tworzenia zbiorów  $V_{lm}^t$  oraz  $V_{ml}^t$  kończy się.

## 5.5. Określenie rozmiaru nadgrafu i grafu de Bruijna

Dalej analizować będziemy graf de Bruijna postaci  $B(l, k, s)$ , gdzie:  $l$  – długość słowa;  $k$  – podstawa alfabetu;  $s$  – różnica pokrycia słów. Macierz sąsiedztwa takiego grafu jest kwadratowa i posiada rozmiar  $k^l \times k^l$ . Można ją przekształcić do postaci blokowo-diagonalnej, zawierającej  $k^{l-s}$  bloków o rozmiarze  $k^s \times k^s$ .



Jako  $C_i^w$  oznaczymy zbiór indeksów wierszy  $i$ -tego bloku macierzy sąsiedztwa, a jako  $C_j^k$  zbiór indeksów kolumn. Wtedy element  $C_{i,j}$  macierzy pokrycia wierzchołków bloków możemy zapisać jako:

$$C_{i,j} = C_i^w \cap C_j^k = \{(i-1) + (j-1)k^s\}, \quad (33)$$

gdzie:  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}$ ,  $L_{b-d}$  – liczba bloków macierzy. Wykorzystując wyrażenie (33), macierz pokrycia wierzchołków bloków można zbudować bezpośrednio bez tworzenia macierzy blokowo-diagonalnej.

Zgodnie z wyrażeniem (33), macierz pokrycia wierzchołków bloków dla grafu de Bruijna posiada rozmiar  $k^{l-s} \times k^{l-s}$ . Zauważmy przy tym, że:

$$\left| C_i^w \cap \bigcup_{j=1}^{L_{b-d}} C_j^k \right| = \left| C_j^k \cap \bigcup_{i=1}^{L_{b-d}} C_i^w \right| = k^s. \quad (34)$$

Zauważmy również, że:

$$\left| \bigcup_{j=1}^{L_{b-d}} C_j^k \right| = L_{b-d} |C_j^k|$$

oraz

$$\left| \bigcup_{j=1}^{L_{b-d}} C_j^w \right| = L_{b-d} |C_j^w|$$

W rezultacie, dla dowolnego  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}$  możemy zapisać:

$$L_{b-d} |C_i^w \cap C_j^k| = k^s. \quad (35)$$

W ten sposób, uwzględniając wyrażenia (34) oraz (35), zakładając dodatkowo, że podstawa alfabetu  $k$  jest z góry określona, wartość różnicy  $s$  pokrycia słów możemy określić na podstawie wyrażenia:

$$s = \log_k |C_i^w \cap C_j^k| + \lceil \log_k L_{b-d} \rceil. \quad (36)$$

Dodatkowo zauważmy, że:

$$|C_i^w \cap C_j^k| = |C_{i,j}|, \quad (37)$$

gdzie:  $C_{i,j}$  – element  $i, j$  macierzy pokrycia wierzchołków bloków. Podstawiając wyrażenie (37) do (36) otrzymamy:

$$s = \log_k |C_{i,j}| + \lceil \log_k L_{b-d} \rceil. \quad (38)$$

Obecnie, określimy długość  $l$  słowa dla zdefiniowanej podstawy  $k$  alfabetu. Zauważmy, że rozmiar macierzy sąsiedztwa jest równy sumie rozmiarów bloków, a ponieważ bloki są identyczne możemy przyjąć, że  $k^l = L_{b-d} k^s$ . Zauważmy również, że długość słowa jest sumą różnicy  $s$  pokrycia i samego pokrycia, tj.  $l = s + \log_k k^{l-s}$ . Ponieważ  $k^{l-s} = L_{b-d}$ , uwzględniając wyrażenia (35) i (37) możemy zapisać, że:

$$l = \log_k |C_{i,j}| + 2 \lceil \log_k L_{b-d} \rceil \quad (39)$$

Na bazie powyższych rozważań określimy minimalny rozmiar grafu de Bruijna, przeznaczonego do przechowywania nadgrafu topologii logicznych. Załóżmy, że podstawa  $k$  alfabetu została określona. Wtedy, dla  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}$  i  $h = 1, \dots, H$  różnica  $s$  pokrycia słów może zostać określona wyrażeniem:

$$s = \left\lceil \log_k \max_{i,j} |B_{i,j}| \right\rceil + \left\lceil \log_k \max_h L_{b-d}^h \right\rceil, \quad (40)$$

gdzie:  $L_{b-d}^h$  – liczba bloków diagonalnych  $h$ -tej sieci logicznej. Jeżeli w wyrażeniu (40) uwzględnimy zależności (31) oraz (32) to można go przedstawić w poniższy sposób:

$$s = \left\lceil \log_k \max_{i,j} |B_i^w \cap B_j^k| \right\rceil + \left\lceil \log_k \max_h L_{b-d}^h \right\rceil. \quad (41)$$

Z kolei, długość  $l$  słowa alfabetu możemy zapisać jako:

$$l = \left\lceil \log_k \max_{i,j} |B_{i,j}| \right\rceil + 2 \left\lceil \log_k \max_h L_{b-d}^h \right\rceil, \quad (42)$$

a po uwzględnieniu wyrażen (31) oraz (32) jako:

$$l = \left\lceil \log_k \max_{i,j} |B_i^w \cap B_j^k| \right\rceil + 2 \left\lceil \log_k \max_h L_{b-d}^h \right\rceil. \quad (43)$$

Zauważmy, że w procesie przechowywania struktury sieci logicznych istotnymi są nie tylko wartości samych parametrów, ale również ich wzajemne relacje. Ze sposobu tworzenia grafu de Bruijna oraz opracowanej metody numerowania wierzchołków wynika, że z punktu widzenia tworzenia nadgrafu, istotna jest również różnica pomiędzy długością słowa alfabetu a różnicą pokrycia słów, tj.  $l - s$ . W szczególności, różnica ta wpływa na ilość podgrafów, które mogą zostać wpisane w graf nad alfabetem.

## 5.6. Numerowanie wierzchołków grafu

Istota zaproponowanej metody polega na odpowiednim zakodowaniu numerów wierzchołków dowolnego grafu tak, aby mógł być on zapisany w macierzy sąsiedztwa grafu de Bruijna. W danym przypadku można wykorzystać dwa sposoby kodowania: niezależne i skorelowane. Numerowanie *niezależne* polega na przypisaniu wierzchołkom grafów każdej topologii logicznej indywidualnych numerów kodowych. Oznacza to, że każda z sieci jest niezależna i sieci logiczne mogą być niepowiązane pomiędzy sobą. Z kolei stosując numerowanie *skorelowane*, kilku wierzchołkom różnych sieci logicznych, przypisuje się ten sam numer kodowy.

## 5.7. Numerowanie niezależne

Rozważmy zbiór topologii logicznych, które w sieci fizycznej są rozłączne, tj. nie mają one wspólnych węzłów fizycznych. Innymi słowy topologie te są pomiędzy

sobą niespójne. Niech  $h$ -ta sieć logiczna zostanie przedstawiona za pomocą macierzy  $B^h$  pokrycia wierzchołków bloków. Każdemu z wierzchołków komórki  $B_{ij}^h$  przypisywany jest wierzchołek ze zbioru węzłów grafu de Bruijna. Tak więc, dowolnemu numerowi  $a \in B_{ij}^h$ ,  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}^h$ ,  $h = 1, \dots, H$  wierzchołka ze zbioru numerów wierzchołków topologii logicznej, przypisujemy prywatny numer  $c$  ze zbioru kodowanych numerów wierzchołków grafu nad alfabetem i  $c \in C_{i,j}$ ,  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}^h$ . W ten sposób, wierzchołki dowolnych grafów otrzymują numery:

$$\bigcup_{h=1}^H V_l^h \sim V_{ij} = \bigcup_{h=1}^H V_{ij}^h \subseteq \{(i-1) + (j-1)k^s + \vartheta k^r\}, \quad (44)$$

gdzie:  $\vartheta = 0, 1, \dots, k^s$ ,  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}$ ,  $L_{b-d} = \max_{h=1, \dots, H} L_{b-d}^h$ . Zmienna  $\vartheta$  pozwala zapisać w jednej macierzy pokrycia, wiele wierzchołków należących do różnych topologii logicznych.

Załóżmy, że topologie logiczne są rozłączne (tj. nie posiadają wspólnych węzłów). Wtedy zaproponowana metoda przechowywania macierzy może zostać wykorzystana również do określenia mostów łączących te topologie. W tym celu wykorzystujemy metodykę, którą możemy opisać w następująco: początkowym wierzchołkiem mostu będzie  $v_x \in V_{qj}^x$ ,  $j = 1, 2, \dots, L_{b-d}$ ,  $x = 1, 2, \dots, H$  znajdujący się na dowolnej pozycji  $q$ -tego wiersza macierzy. Wierzchołkiem końcowym mostu jest zaś  $v_y \in V_{iq}^x$ ,  $i = 1, 2, \dots, L_{b-d}$ ,  $y = 1, 2, \dots, H$ , rozmieszczony w dowolnym wierszu  $q$ -tej kolumny macierzy, przy czym:  $x \neq y$ .

W rzeczywistych systemach spotykamy również sieci logiczne rozłączne względem swoich zasobów fizycznych, tj.  $V_f^h \cap V_f^i = \emptyset$ , gdzie:  $V_f^h, V_f^i$  – zbiór węzłów fizycznych, odpowiednio  $h$ -tej oraz  $i$ -tej sieci logicznej,  $h, i = 1, 2, \dots, H$ ,  $h \neq i$ . Oznacza to, że w celu umożliwienia komunikacji pomiędzy nimi konieczne będzie określenie lokalizacji mostów. Niech  $M_l$  oznacza zbiór łuków logicznych, łączących wierzchołki logiczne rozłącznych sieci logicznych i  $M_l = E_l \setminus \bigcup_{h=1}^H S_l^H$ . Wtedy,  $M_l$  jest uzupełnieniem zbioru  $E_l$  łuków nadgrafu sieci logicznych. W rezultacie otrzymujemy:

$$\bigcup_{h=1}^H G_l^h(V_l^h, E_l^h) \cup M_l \cong G_l(V_l, E_l) \subseteq B(l, k, r) \quad (45)$$

## 5.8. Numerowanie skorelowane

W numerowaniu skorelowanym topologie logiczne przedstawiane są jako jeden podgraf indukowany grafu de Bruijna. Rozważmy zatem  $h$ -tą topologię logiczną  $G_l^h = (V_l^h, E_l^h)$ . Dla każdego z wierzchołków  $v \in V_l^h$  wprowadzimy funkcję odwzorowania  $f: \{v^h\} \rightarrow v$ , która pewnemu podzbirowi  $\{v^h\}$  zbioru  $V_l^h$  wierzchołków sieci logicznej przyporządkowuje jeden jedyny wierzchołek  $v$ . Z inżynierskiego punktu widzenia operacja ta zamienia grupę wierzchołków jednym wspólnym wierzchołkiem. Przyjmijmy, że zbiór  $\{v^h\}$  ma postać  $\{v^h\} = \{v_k^\alpha, v_l^\beta, \dots, v_m^\chi\}$ , gdzie:

$\alpha \neq \beta \neq \dots \neq \chi$  oraz  $\alpha, \beta, \dots, \chi \in [1, H]$ . Funkcja  $f$  jest wykonywana na zbiorze  $\bigcup_{h=1}^H V_l^h$  wierzchołków, należących do różnych topologii logicznych, a jej działanie można zapisać jako:

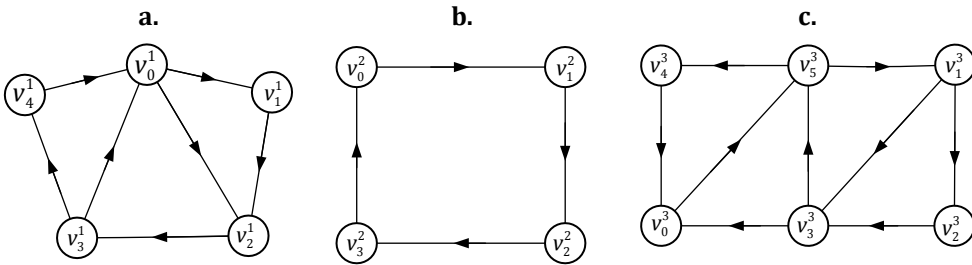
$$f(v_k^\alpha, v_l^\beta, \dots, v_m^\chi) \rightarrow v_{kl, \dots, m}^{\alpha\beta, \dots, \chi} \cong v^\omega \in V_{ij}, \quad (46)$$

gdzie:  $i, j = 1, \dots, L_{b-d}, L_{b-d} = \max_{h=1, \dots, H} L_{b-d}^H$  oraz  $\alpha \neq \beta \neq \dots \neq \chi \in [1, \dots, T]$ .

Z wykorzystaniem funkcji  $f$ , wierzchołkom ze zbioru  $\{v_k^\alpha, v_l^\beta, \dots, v_m^\chi\}$ ,  $\alpha \neq \beta \neq \dots \neq \chi \in [1, \dots, H]$ , przypisuje się jeden numer kodowy, pozostałe węzły otrzymują numery prywatne. Numery prywatne należy przypisywać wyłącznie wierzchołkom, które wchodzi tylko w jeden element macierzy. Wierzchołkom, które należą do różnych elementów macierzy, prywatny numer nie jest nadawany.

### 5.9. Przykład kodowania

Rozważmy trzy topologie logiczne przedstawione na rys. 30, odpowiednio za pomocą grafów  $G_1 = (V_1, E_1)$  (a.),  $G_2 = (V_2, E_2)$  (b.) oraz  $G_3 = (V_3, E_3)$  (c.). Przy oznaczaniu wierzchołków przyjmujemy zasadę, zgodnie z którą górny indeks oznaczać będzie numer grafu, dolny zaś numer wierzchołka, na przykład:  $v_3^1$  oznacza wierzchołek 3 grafu 1.



Rys. 30. Grafy przykładowych topologii logicznych

**Krok 1.** Przedstawienie sieci połączeniowej w postaci macierzy sąsiedztwa wierzchołków i jej diagonalizacja

Macierze sąsiedztwa wierzchołków mają przed i po sprowadzeniu ich do postaci blokowo-diagonalnej przedstawioną poniżej postać. Do wykonania diagonalizacji możemy użyć dowolnej metody, w tym również jednej z przedstawionych w pracy [12].

Graf  $G_1$

	0	1	2	3	4
0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	1	0
3	1	0	0	0	1

	1	2	3	0	4
0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	1

4	1	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---

Graf  $G_2$

	0	1	2	3
0	0	1	0	0
1	0	0	1	0
2	0	0	0	1
3	1	0	0	0

4	0	0	0	1	0
---	---	---	---	---	---

	1	2	3	0
0	1	0	0	0
1	0	1	0	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	1

Graf  $G_3$ 

	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0	1
4	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0

	0	5	2	3	1	4
0	0	1	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	1

**Krok 2. Budowa macierzy przecięć numerów wierzchołków**

W tabeli 1 przedstawiono zbiory wierzchołków bloków macierzy blokowo-diagonalnych dla wszystkich rozpatrywanych grafów.

Tabela 1. Zbiory wierzchołków bloków macierzy blokowo-diagonalnych

$l$	$V_{lm}^1$	$V_{ml}^1$	$l$	$V_{lm}^2$	$V_{ml}^2$	$l$	$V_{lm}^3$	$V_{ml}^3$
1	0,1	1,2	1	0	1	1	0,3,4	0,5
2	2	3	2	1	2	2	1,2	2,3
3	3,4	0,4	3	2	3	3	5	1,4
			4	3	0			

W ten sposób, elementy macierzy pokryć numerów wierzchołków grafów dla grafów  $G_1$ ,  $G_2$  i  $G_3$  będą miały postać przedstawioną w tabeli.

Tabela 2. Elementy macierzy pokryć.

$G_1$	$G_2$	$G_3$
$V_{1,1}^1=1$ ; $V_{1,2}^1=\emptyset$ ; $V_{1,3}^1=0$ ; $V_{2,1}^1=2$ ; $V_{2,2}^1=\emptyset$ ; $V_{2,3}^1=\emptyset$ ;	$V_{1,1}^2=\emptyset$ ; $V_{1,2}^2=\emptyset$ ; $V_{1,3}^2=\emptyset$ ; $V_{1,4}^2=0$ ; $V_{2,1}^2=1$ ; $V_{2,2}^2=\emptyset$ ; $V_{2,3}^2=\emptyset$ ; $V_{2,4}^2=\emptyset$ ;	$V_{1,1}^3=0$ ; $V_{1,2}^3=3$ ; $V_{1,3}^3=4$ ; $V_{2,1}^3=\emptyset$ ; $V_{2,2}^3=2$ ; $V_{2,3}^3=1$ ;

$V_{3,1}^1 = \emptyset$ ; $V_{3,2}^1 = 3$ ; $V_{3,3}^1 = 4$ .	$V_{3,1}^2 = \emptyset$ ; $V_{3,2}^2 = 2$ ; $V_{3,3}^2 = \emptyset$ ; $V_{3,4}^2 = \emptyset$ ; $V_{4,1}^2 = \emptyset$ ; $V_{4,2}^2 = \emptyset$ ; $V_{4,3}^2 = 3$ ; $V_{4,4}^2 = \emptyset$ .	$V_{3,1}^3 = 5$ ; $V_{3,2}^3 = \emptyset$ ; $V_{3,3}^3 = \emptyset$ .
--	--	--

Macierze pokryć numerów wierzchołków przyjmą postać z tabeli 3.

Tabela 3. Zbiory wierzchołków bloków macierzy blokowo-diagonalnych

$C_{G_1}$	1	2	3	$C_{G_2}$	1	2	3	4	$C_{G_3}$	1	2	3
1	1	$\emptyset$	0	1	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	0	1	0	3	4
2	2	$\emptyset$	$\emptyset$	2	1	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	2	$\emptyset$	2	1
3	$\emptyset$	3	4	3	$\emptyset$	2	$\emptyset$	$\emptyset$	3	5	$\emptyset$	$\emptyset$
				4	$\emptyset$	$\emptyset$	3	$\emptyset$				

Połączona macierz pokrycia numerów wierzchołków dla grafów  $G_1, G_2, G_3$  przyjmie postać przedstawioną w tabeli 4.

Tabela 4. Połączona macierz przecięcia numerów wierzchołków

$C_{G_1 \cup G_2 \cup G_3}$	1	2	3	4
1	$\{v_1^1, v_0^3\}$	$\{v_3^3\}$	$\{v_0^1, v_4^3\}$	$\{v_0^2\}$
2	$\{v_2^1, v_1^2\}$	$\{v_2^3\}$	$\{v_1^3\}$	0
3	$\{v_5^3\}$	$\{v_3^1, v_2^2\}$	$\{v_4^1\}$	0
4	0	0	$\{v_2^3\}$	0

Obecnie przejdziemy do wykonania procedury kodowania wierzchołków, którą wykonamy dla obu zaprezentowanych sposobów.

### SPOSÓB 1 – Kodowanie niezależne

#### Krok 1. Wybór rozmiaru grafu

Zakładając, że  $k = 2$  obliczamy wartości  $s = 3$  (wyrażenie (40)) oraz  $l = 5$  (wyrażenie (42)) dla podgrafu grafu de Bruijna.

#### Krok 2. Numerowanie wierzchołków

Wierzchołkom grafów  $G_1 = (V_1, E_1)$ ,  $G_2 = (V_2, E_2)$ ,  $G_3 = (V_3, E_3)$  przypisujemy zakodowane numery wierzchołków grafu  $B(5,2,3)$  (patrz Tabela 5).

Tabela 5. Przypisanie numerów wierzchołków grafów dla niezależnej numeracji

Parametry grafu de Bruijna	Węzeł w sieci	Wiersz i kolumna w macierzy	Kodowany numer
1	2	3	4
$l = 5$	Sieć 1		

$k = 2$ $s = 3$	$v_0^1$	1,3	10000
	$v_1^1$	1,1	00000
	$v_2^1$	2,1	00001
	$v_3^1$	3,2	01010
	$v_4^1$	3,3	10010
	<b>Sieć 2</b>		
	$v_0^2$	1,4	11000
	$v_1^2$	2,1	00101
	$v_2^2$	3,2	01110
	$v_3^2$	4,3	10011

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$l = 5$ $k = 2$ $s = 3$	<b>Sieć 3</b>			
	$v_0^3$	1,1	00100	
	$v_1^3$	2,3	10101	
	$v_2^3$	2,2	01001	
	$v_3^3$	1,2	01000	
	$v_4^3$	1,3	10100	
	$v_5^3$	3,1	00010	

**Krok 3. Lokalizacja mostów**

Określamy zbiór mostów:  $v_5^3(00010) \rightarrow v_0^1(10000)$ ,  $v_0^2(11000) \rightarrow v_0^3(00100)$  itd.

**SPOSÓB 2. Numerowanie skorelowane****Krok 1. Określenie przypisania.**

Na podstawie macierzy przecięć numerów wierzchołków określamy te spośród wierzchołków, którym zostaną przypisane oryginalne numery kodowe i wykonujemy na nich operację numerowania:  $f: \{x_1^1, x_3^0\} \rightarrow x_{10}^{13}$ ,  $f: \{x_0^1, x_4^3\} \rightarrow x_{04}^{13}$ ,  $f: \{x_2^1, x_1^2\} \rightarrow x_{21}^{12}$ ,  $f: \{x_3^1, x_2^2\} \rightarrow x_{32}^{12}$ .

**Krok 2. Określenie rozmiaru podgrafu.**

Zakładając, że  $k = 2$  zobliczamy wartości  $s = 2$  (wyrażenie (40)) oraz  $l = 4$  (wyrażenie (42)) dla podgrafu grafu de Bruijna.

**Krok 3.** Kodowanie wierzchołków.

Wierzchołkom grafów  $G_1 = (V_1, E_1)$ ,  $G_2 = (V_2, E_2)$ ,  $G_3 = (V_3, E_3)$  przypisujemy kodowane numery grafu przecięć kodowych  $B(4,2,2)$  (patrz Tabela 6).

Tabela 6. Przypisanie numerów wierzchołków grafów dla skorelowanej numeracji

Parametry grafu de Bruijna	Węzeł w sieci	Wiersz i kolumna w macierzy	Kodowany numer
1	2	3	4
$l = 4$ $k = 2$ $s = 2$	<b>Sieć 1</b>		
	$v_0^1$	1,3	1000
	$v_1^1$	1,1	0000
	$v_2^1$	2,1	0001
	$v_3^1$	3,2	0110
	$v_4^1$	3,3	1010

1	2	3	4
$l = 4$ $k = 2$ $s = 2$	<b>Sieć 2</b>		
	$v_0^2$	1,4	1100
	$v_1^2$	2,1	0001
	$v_2^2$	3,2	0110
	$v_3^2$	4,3	1011
	<b>Sieć 3</b>		
	$v_0^3$	1,1	0000
	$v_1^3$	2,3	1001
	$v_2^3$	2,2	0101
	$v_3^3$	1,2	0100
	$v_4^3$	1,3	1000
	$v_5^3$	3,1	0010

Wykorzystanie, zaproponowanej jednolitej przestrzeni informacyjnej (kodowej) pozwala efektywnie rozwiązywać szereg zadań spotykanych w syntezie i analizie obiektów technicznych. Oprócz ograniczenia złożoności pamięciowej i umożliwie-



nia wyszukiwania mostów, metoda może być wykorzystana do określenia najkrótszych ścieżek w systemie infrastruktury krytycznej. Zadanie to, polega na określe- niu ścieżek ewakuacji poprzez kilka niezależnych sieci transportowych. Długość takiej ścieżki definiowana jest jako suma długości ścieżek w poszczególnych syste- mach transportowych. Niestety, w ogólnym przypadku ścieżka taka nie jest naj- krótszą łączącą wskazane lokalizacje. Wykorzystanie właściwości grafów przecięć kodowych pozwala formalizować i optymalizować procedurę określenia najkrót- szych ścieżek, w sieciach wieloelementowych. Określenie ścieżek, sprowadza się do wykonania sekwencji procedur obliczeniowych nad kombinacjami numerów wierzchołków. Procedury te są proste i nie krytyczne względem wymaganych za- sobów, w szczególności w odniesieniu do pamięci komputera. Wykorzystanie sfor- malizowanej prezentacji połączeń jest efektywne dla komputerów, w szczególno- ści przy rozwiązaniu złożonych zadań modelowania obiektów technicznych.



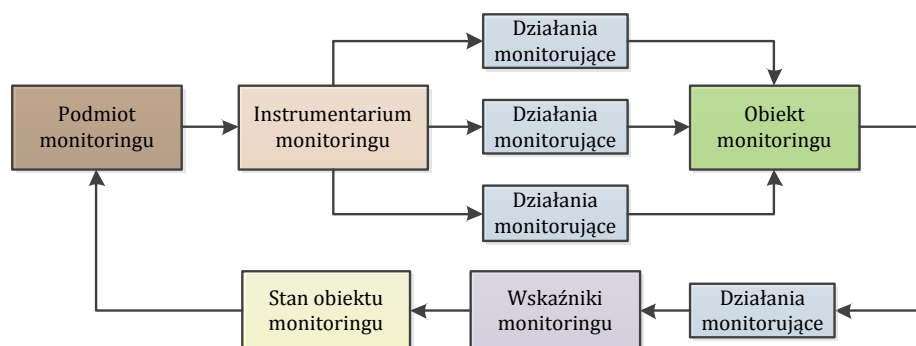
## ROZDZIAŁ 6

### Adaptacyjne systemy monitoringu środowiskowego

#### 6.1. Wprowadzenie

##### 6.1.1. Pojęcie monitoringu środowiska naturalnego

Termin *monitoring* pojawił się w drugiej połowie XX wieku i określał on system powtarzalnych, ukierunkowanych obserwacji jednego lub więcej elementów otaczającej przyrody w czasie i przestrzeni. Większość badaczy, pojęciem *systemu monitoringu* określa zbiór elementów tworzących strukturę przeznaczoną do zbierania i przetwarzania informacji o stanie otaczającego nas środowiska. Elementami tymi są: obiekty i podmioty monitoringu, jego instrumentarium, zestaw wskaźników monitorowania oraz działania monitorujące. Wzajemne relacje pomiędzy powyższymi elementami przedstawiono na rys. 31.

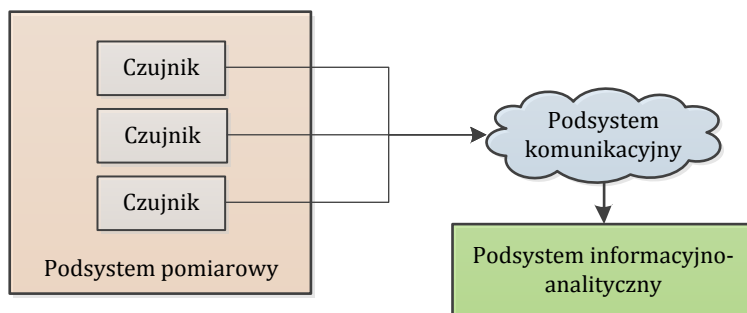


Rys. 31. Elementy systemu monitoringu i ich wzajemne relacje.

Najczęściej, *obiektami* monitoringu są złożone systemy i zjawiska. Wspólną cechą wszystkich obiektów monitoringu jest wysoka dynamika zachodzących w nich zmian, tylko w takim przypadku celowym jest ich monitorowanie. Obiekty, których zachowanie ma charakter statyczny mogą być najczęściej obserwowane metodami klasycznymi. *Podmiotami monitoringu* są najczęściej nośniki funkcji monitorowania, tj. organizacje, struktury organizacyjne oraz ludzie, którzy wykonują powyższe działania. Podmiot nie tylko wydaje dyspozycje monitorowania, ale zainteresowany jest również w jego rezultatach. *Zestaw wskaźników monitoringu*, to zbiór mierzonych wielkości, znajomość wartości których zapewnia kompleksowy opis stanu środowiska, w szczególności dane o ilościowych i jakościowych jego zmianach. *Instrumentarium monitoringu* tworzy zbiór środków sprzętowo-programowych niezbędnych do przeprowadzenia pomiarów, ich obróbki statystycznej, pro-

gnozowania oraz informowania i ostrzegania ludności o stanie środowiska i potencjalnych zagrożeniach. Jest ono wykorzystywane w swojej działalności przez podmioty monitoringu. *Działania monitorujące* są zbiorem procedur funkcjonalnych włączających: zbieranie i przetwarzanie informacji, jej wizualizację, a także przygotowanie propozycji niezbędnych działań będących reakcją na stan środowiska, w tym również zmieniających działanie samego systemu monitoringu.

Rozróżniamy trzy podstawowe rodzaje działań wykonywanych w systemach monitorujących: **a.** organizacja i przeprowadzenie monitoringu, do czego wykorzystuje się podsystem pomiarowy; **b.** zbieranie wyników pomiarów prowadzone przez podsystem komunikacyjny; **c.** przetworzenie danych pomiarowych wraz ze sformułowaniem rekomendacji dotyczących ich wykorzystania, czym zajmuje się podsystem informacyjno-analityczny. Wzajemne relacje pomiędzy powyższymi działaniami i realizującymi je komponentami pokazano na rys. 32.



Rys. 32. Wzajemne powiązanie komponentów monitorujących.

Monitoring jako sekwencję wzajemnie powiązanych działań można podzielić na trzy, występujące po sobie etapy: **a.** przygotowawczy mający na celu prawną i normatywną organizację monitoringu [77], [78]; **b.** wykonawczy, w którego trakcie prowadzone są pomiary, a ich rezultaty przesyłane są do węzła zajmującego się ich dalszą obróbką [79], [80], [81]; **c.** analityczno-decyzyjny, kiedy rezultaty monitoringu są przetwarzane, a następnie wykorzystywane w procesie zarządzania [81], [82].

## 6.2. Formalny opis procesu monitoringu

Ponieważ monitorowane środowisko to system złożony, proponowana teoria przyczynia się do rozwoju teorii takich systemów. *Systemem złożonym* będziemy nazywać obiekt składający się z wielu elementów, każdy z których możemy rozpatrywać jako system. Z zasady, elementy te zgodnie z pewnymi, określonymi zasadami połączone są w jedną integralną całość lub powiązane są odpowiednimi relacjami funkcjonalnymi. W każdym momencie czasu elementy dowolnego systemu złożonego znajdują się w jednym z możliwych stanów. Przejście pomiędzy nimi dokonywane jest pod wpływem czynników wewnętrznych lub zewnętrznych. Dynamika zachowania systemu złożonego przejawia się w tym, że stan elementu oraz

jego sygnały wyjściowe, w każdym momencie czasu określane są jego poprzednimi stanami oraz sygnałami wejściowymi pochodzącymi od innych elementów systemu lub zewnętrznego względem niego środowiska. W teorii systemów złożonych, pojęciem *środowiska zewnętrznego* określamy zbiór obiektów nie będących obiektami danego systemu, współdziałanie z którymi jest uwzględniane w procesie jego badania. Elementy systemów złożonych funkcjonują we wzajemnym powiązaniu: właściwości każdego z elementów zależą od warunków określonych przez pozostałe elementy tego systemu. Właściwości systemu złożonego jako całości określone są nie tylko właściwościami jego elementów składowych, ale także charakterem współdziałania pomiędzy nimi [83].

Podstawową metodą badania systemów złożonych opisywaną przez teorię jest modelowanie matematyczne. Aby go przeprowadzić, należy formalizować procesy funkcjonowania systemu, tj. przedstawić go w postaci sekwencji ściśle określonych zdarzeń, zjawisk lub procedur, a następnie stworzyć jego opis matematyczny. Zgodnie z teorią modelowania, w celu sformalizowanego przedstawienia dowolnego obiektu  $O$ , w pierwszej kolejności należy określić wszystkie jego atrybuty, tworząc w ten sposób statyczny model obiektu. Następnie, opisaniu podlega proces  $Q$  zmian ich wartości w czasie, będący rezultatem działania różnych czynników, który tworzy model zachowania obiektu w zadanych warunkach. W dalszych rozważaniach przyjmujemy, że:  $K$  to identyfikator obiektu zawartego w przestrzeni klasyfikującej;  $A$  jest opisem niezmiennych atrybutów  $K$  obiektu, a  $V$  to opis właściwości, relacji oraz funkcji określających zachowanie się badanego obiektu. Ponieważ model ten ma charakter statyczny, zawsze opisuje on stan systemu w pewnym momencie czasu  $t$ . Uwzględniając powyższe ustalenia, statyczny model obiektu  $O$  możemy określić jako:

$$O \rightarrow (K, A, V, t) \quad (47)$$

Proces zmian stanu obiektu w czasie, pod wpływem zbioru czynników wewnętrznych i zewnętrznych nazywamy zachowaniem się obiektu. Proces ten można opisać poniższym wyrażeniem:

$$Q \rightarrow (K, G, F, T) \quad (48)$$

gdzie  $F$  – baza przestrzeni czynników wpływających na zachowanie obiektu.

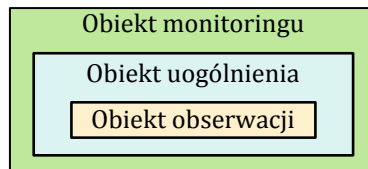
Jak zaznaczono wcześniej, z punktu widzenia zachowania się obiektu, czas odgrywa szczególną rolę, czas  $T$  został wyniesiony poza zbiór  $F$  czynników. Z kolei  $G$ , to zbiór wszystkich atrybutów obiektu, podzielonych na dwa podzbiory:  $A$  – podzbiór atrybutów niezmiennych;  $X$  – podzbiór atrybutów parametrycznych, zmieniających się w czasie pod wpływem wewnętrznych lub zewnętrznych czynników zawartych w zbiorze  $F$ . Przy tym,  $G = A \cup X$ . Do podzbioru  $A$  należą takie atrybuty jak: nazwa obiektu, jego numer identyfikacyjny, lokalizacja geograficzna itp. Z kolei podzbiór  $X$ , zawiera charakterystyki będące parametrami obiektu, które są funkcjami czasu oraz czynników ze zbioru  $F$  wpływających na obiekt  $O$ .

Zbiór wartości wszystkich atrybutów obiektu w momencie czasu  $t$  nosi nazwę stanu danego obiektu. Zbiór atrybutów  $(A_1, A_2, \dots, A_s, X_1, X_2, \dots, X_n, t)$  tworzy przestrzeń stanów obiektu  $O$ , a zbiór wartości tych zmiennych nazywa się jego współrzędnymi stanu. Sekwencyjna zmiana stanu obiektów monitoringu, wyrażonego za pomocą wskaźników monitoringu nosi nazwę procesu monitoringu. Zgodnie z wprowadzonymi oznaczeniami:

$$Q = f(K, A, X, T), \quad (49)$$

to matematyczny opis procesu zmian stanu obiektu monitoringu.

Aby funkcjonowanie systemu monitoringu zapewniało wiarygodne dane o stanie środowiska przy minimalnych nakładach na jego realizację, konieczne jest wprowadzenie powiązanych hierarchicznie poziomów generalizacji informacji o obiektach monitorowania. Jeżeli generalizacji będą podlegać obiekty i one też będą jej rezultatem, możemy wyróżnić trzy podstawowe ich typy opisywane argumentem  $K$  ze wzoru (49). Są to obiekty: obserwacji, uogólnienia oraz monitoringu, relacje pomiędzy którymi pokazane zostały na rys. 33.



Rys. 33. Wzajemne relacje pomiędzy klasami obiektów.

*Obiekty obserwacji*, to obiekty będące przedmiotem ciągłego śledzenia za wybranymi ich charakterystykami, co wykonywane jest poprzez bezpośredni ich pomiar. *Obiektem uogólnienia* nazywać będziemy zbiór obserwowanych obiektów, grupowanych z wykorzystaniem kryteriów tematycznych, przestrzennych lub czasowych, na podstawie których wykonywana jest analiza stanu środowiska i prognozowanie jego zmian. O ile obiekty obserwacji są opisywane parametrami, których znaczenie określa się w drodze pomiaru, to obiekty uogólnienia opisuje się parametrami obliczeniowymi określanymi na podstawie formuł matematycznych lub statystycznych. *Obiekty monitoringu*, to złożone obiekty systemowe, których stan opisuje się za pomocą ocen integralnych, pozwalające całościowo przedstawić ilościowe i jakościowe zmiany stanu badanego systemu. Możemy więc zapisać że:  $K = \{K_o, K_u, K_m\}$ , gdzie:  $K_o$  – podzbiór obiektów obserwacji;  $K_u$  – podzbiór obiektów uogólnienia;  $K_m$  – podzbiór obiektów monitoringu.

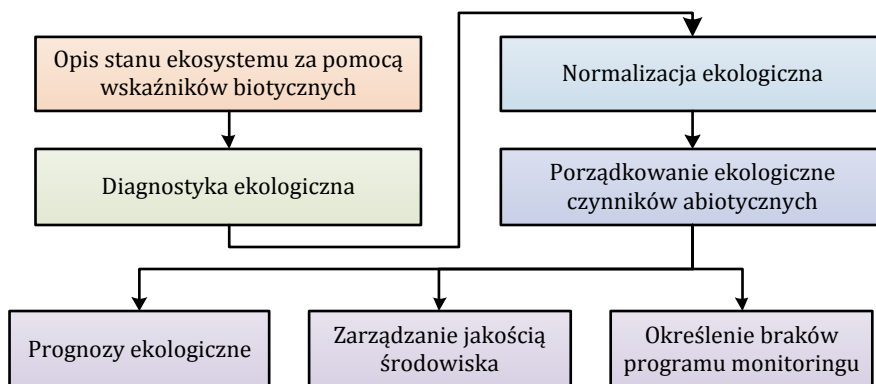
W opisie bazującym na wyrażeniu (49)  $A$  oznacza atrybuty obiektów i ich najważniejsze właściwości. Przy tym,  $A = \{\cup A_{K_o}, \cup A_{K_u}, \cup A_{K_m}\}$ . Z kolei  $X$  opisuje charakteryzujące stan obiektu właściwości parametryczne, które określane są czynnikami wewnętrznymi lub zewnętrznymi. Podobnie jak w przypadku atrybutów

przyjmujemy, że  $X = \{\cup X_o(t), \cup X_u(t), \cup X_m(t)\}$ . Argument  $T$  wyrażenia (49) definiuje okresowość rejestracji dynamiki zmian stanu obiektów, tj. uzyskania wyników pomiarów, ich uogólnienia i uzyskania wyników monitoringu, a także moment  $t_0$  rozpoczęcia procesu obserwacji. Argument ten ma postać:  $T = \{T_o, T_u, T_m, t_0\}$ .

### 6.3. Etapy analizy danych

Etapy analizy danych uzyskanych w rezultacie monitoringu rozważmy na przykładzie systemu monitoringu ekologicznego. Zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami jego działanie można rozbić na dwa podstawowe etapy: **a.** zbierania, przesyłania i przechowywania danych obserwacji biotycznych i abiotycznych czynników ekosystemu; **b.** analizy zebranych danych prowadzącej do opracowania rozwiązań dotyczących perspektywy funkcjonowania i wykorzystania ekosystemu. Oznacza to, że w systemie takim niezbędne są metodyki łączące w sobie metodyki oceny i diagnostyki środowiska, normalizację i porządkowanie potencjalnych zagrożeń oraz prognozowanie i regulację stanu ekosystemu.

Analiza danych powinna odbywać się w kilku etapach, które zostały zaprezentowane na rys. 34.



Rys. 34. Etapy analizy danych monitoringu środowiskowego.

Teoretycznie, etapy przedstawione na rys. 34. można traktować jako niezależne kroki. Jednak tylko przejście wszystkich z nich, pozwala określić trafną strategię perspektywicznego wykorzystania badanego ekosystemu, racjonalnie planować jego obciążenia antropogeniczne, tak aby nie dopuścić do pojawienia się w nim istotnych szkód.

Analiza danych monitoringu rozpoczyna się od oceny ekologicznego stanu środowiska, która nazywana jest także *bioindykacją*. Polega ona na określeniu nieprzyjaznych dla środowiska czynników i porównaniu ich z dopuszczalnymi wartościami. Dla różnych typów środowisk wykorzystuje się różne metody takiej oceny. Kolejnym etapem jest tzw. *diagnostyka ekologiczna*, polegająca na określeniu szkodliwego wpływu przyrody nieożywionej na ekosystem. Na etapie tym, określane są

konkretne nieprzyjemne czynniki. Następnie, wykonywana jest tzw. *normalizacja ekologiczna* polegająca na określeniu granicznych wartości czynników niebezpiecznych dla ekosystemu, których przekroczenie może spowodować nieakceptowalne konsekwencje. Zauważmy, że wpływ różnych czynników na ekosystem nie jest jednakowy. Dlatego, niezbędny jest kolejny etap, tzw. *porządkowanie czynników*.

Rezultatem wszystkich powyższych etapów jest wykaz czynników abiotycznych szkodliwych dla ekosystemu, określenie ich wartości dopuszczalnych ekologicznie oraz uporządkowanie czynników z punktu widzenia ich ważności ekologicznej. Dopiero teraz można przejść do przygotowania *prognoz ekologicznych*, a także zarządzania ekosystemem.

#### **6.4. Optymalizacja instrumentarium systemu monitoringu**

W celu rozwiązania zadania optymalizacji instrumentarium rozważmy regionalny system monitoringu środowiska (RSMS). Bezsprzecznie, najważniejszym zadaniem stojącym przed nim jest bezawaryjne dostarczanie, w akceptowalnych kosztach, wiarygodnej informacji o stanie środowiska. Z tego powodu, RSMS powinien posiadać strukturę hierarchiczną i zostać wyposażony w zunifikowany zestaw wielofunkcyjnych sensorów o wysokiej wydajności i niskich nakładach na obsługę. Dlatego też, konieczne jest opracowanie formalnych metod i algorytmów projektowania i optymalizacji jego architektury.

Synteza i analiza systemów przedstawionych w postaci wielopoziomowych organizacji ze strukturą hierarchiczną jest jednym ze znanych kierunków badania systemów o dużym rozmiarze i złożoności, do których możemy odnieść RSMS. Ogólnymi zagadnieniami w tym zakresie zajmowali się w swoich licznych publikacjach m. in. M.D. Mesarovic, T.L. Saaty, L.P. Jennergren, F. Murtagh, P. Willett, Y.B. Germeyer, G.P. Zakharov.

Dla rozważanych struktur hierarchicznych celem jest formalne określenie liczby poziomów oraz dobór elementów poszczególnych warstw i sposobów ich powiązania tak, aby powstała strukturę charakteryzowały minimalne koszty projektowania, budowy i eksploatacji oraz maksymalna efektywność. Dotąd, w tym celu, bazując na zwartym opisie, definiowano zbiór dopuszczalnych struktur i kryteriów ich oceny. Rezultatem takich działań były najczęściej zalecenia dotyczące wyboru tej lub innej hierarchii przeznaczonej dla konkretnych zastosowań. Podejście takie, co prawda, pozwalało rozwiązać zadanie wyboru hierarchii, ale rozwiązanie ograniczało się do obszaru konkretnego zwartego opisu. Ponadto zadanie syntezy hierarchii wykonywane było wyłącznie na poziomie jakościowym, a modele ilościowe, bądź nie były w ogóle rozpatrywane, bądź nosiły wyłącznie szczególny charakter. Do formalnego rozwiązania postawionego zadania stosowano również metody określania optymalnej hierarchii wykorzystywane dotąd, przede wszystkim, w zarządzaniu, sterowaniu i bioinformatyce. Tematem tym zajmowali się m. in.: B. Mirkin, G. Wynants, M.V. Gubko oraz M.Sh. Levin.



Możliwe jest również teoriografowe rozwiązanie zadania. W tym celu rozważmy zbiór grafów dopuszczalnych hierarchii  $\{G_i = (V_i, E_i)\}$ , gdzie:  $i = 1, \dots, n$ . Załóżmy, że poszukujemy hierarchii opisanej grafem  $G^* \in \{G_i\}$  charakteryzującej się maksymalną wartością oceny wybranej właściwości lub ich zbioru. W tym celu będziemy analizować wektor  $\Psi$  cząstkowych wskaźników efektywności grafu  $G_{i_1} \in \{G_i\}$  określony jako:  $\Psi(G_{i_1}) = (\psi_1(G_{i_1}), \dots, \psi_k(G_{i_k}), \dots, \psi_m(G_{i_m}))$ . Wtedy funkcja celu będzie miała postać  $\max_{G^* \in \{G_i\}} \psi_k(G^*)$ ,  $\forall k = 1, \dots, m$ . Można poszukiwać również hierarchii najbardziej zbliżonej do określonej wcześniej wzorcowej struktury lub ich zbioru. Graf docelowej (wzorcowej) hierarchii oznaczmy jako  $G_c = (V_c, E_c)$  i  $G_c \in \{G_i\}$ . W celu oceny odległości wybranego grafu od grafu docelowej hierarchii wprowadzimy funkcję bliskości  $\rho$ . Dla dwóch dowolnych grafów  $G_{i_1}$  i  $G_{i_2}$  należących do zbioru dopuszczalnych hierarchii (tj.  $G_{i_1}, G_{i_2} \in \{G_i\}$ ), funkcja  $\rho(G_{i_1}, G_{i_2})$  określa bliskość pomiędzy tymi grafami. W tym przypadku funkcja celu przyjmuje postać:  $\min_{G^* \in \{G_i\}} \rho(G^*, G_c)$ . Wykorzystując zintegrowaną definicję obu zadań możemy zapisać nową funkcję celu:  $\min_{G^* \in \{G_i\}} \rho(G^*, G_c)$ , dla  $\psi_k(G^*) \geq r_k$ ,  $\forall k = 1, \dots, m$ , gdzie:  $r_k$  – ograniczenia wartości ocenianych właściwości. Powyższe zadania optymalizacyjne odpowiadają złożonym modelom programowania całkowitoliczbowego (lub mieszanego całkowitoliczbowego), dla których można wykorzystać różnorodne metody rozwiązania od prostego przeszukiwania począwszy, na metodach sztucznej inteligencji skończywszy.

Zadanie określenia liczby i typów poziomów RSMS może być przedstawione również, jako zadanie wielopoziomowego rozmieszczenia, a do jego przybliżonego rozwiązania można zastosować metodę bazującą na liniowej relaksacji i rozwiązaniu zadania dualnego z lokalną poprawą rozwiązania. Jeżeli niezbędne jest dokładne rozwiązanie zadania można zastosować metodę gałęzi i granic. Jeżeli na strukturę projektowanego systemu nakładane są dodatkowe ograniczenia, to można zastosować metody: poszukiwania drzewa rozpinającego z ograniczonym promieniem; budowy optymalnego drzewa Steinera z limitowanymi długościami ścieżek i ograniczoną ilością punktów Steinera oraz poszukiwania prostokątnego drzewa Steinera z ścieżkami jednakowej długości. Niestety wszystkie powyższe metody należą do grupy algorytmów NP-zupełnych i są mało atrakcyjne dla rozwiązania postawionego zadania.

Powyższe uwarunkowania zdecydowały o opracowaniu własnej metody doboru instrumentarium RSMS. W tym celu, zaproponowano podejście dwustopniowe: w pierwszym kroku dokonywany jest wybór asortymentu stosowanych sensorów, w drugim zaś określone są kryteria, na podstawie których wykonana zostanie optymalizacja zestawu środków pomiarowych.

Zadanie wstępnego doboru komponentów, to typowe podzadanie projektowania systemu złożonego, polegające na wyborze zestawu konkretnych urządzeń oraz porównaniu go z rozwiązaniami alternatywnymi. Etap porównania bazuje najczęściej na klasycznych metodach kwalimetrycznych, systemach ekspertowych lub sztucznej inteligencji. Rezultaty tego kroku wykorzystywane są dalej w optymalizacji zestawu urządzeń, której zadaniem jest poprawa parametrów eksploatacyjnych RSMS. Z punktu widzenia efektywności eksploatacji celem jest uwzględnienie charakterystyk opisujących ilość pomiarów wykonywanych przez konkretny zestaw sensorów w jednostce czasu. Uwzględniając periodyczność zachodzących zjawisk środowiskowych wspomniana ilość powinna dotyczyć stosunkowo długiego okresu czasu, najlepiej roku. W szczególności, można zapewniać maksymalne obciążenia sensora lub ich zestawów w trakcie wykonania zadanego programu monitoringu, bądź dążyć do minimalizacji kosztów jednostkowych pomiaru.

Danymi wyjściowymi algorytmów doboru i optymalizacji są lista  $a_i$  określająca mierzone parametry ekosystemu ( $i = 1, \dots, n$ ) oraz lista  $b_j$  typów sensorów wykorzystywanych do pomiaru parametrów określonych przez  $a_i$  ( $j = 1, \dots, m$ ). Ponieważ sensory są wielofunkcyjne i mogą mierzyć wiele różnych parametrów, zazwyczaj  $n \gg m$ . Przyjmijmy również, że okresem rozliczeniowym będzie rok. Niech  $\tau_{ij}$  oznacza czas niezbędny sensorowi  $j$ -tego typu do wykonania pomiaru  $i$ -tego parametru,  $\tau_{ij} \in \mathbb{Q}$ , a  $R_i$  to liczba pomiarów  $i$ -tego parametru w cyklu rozliczeniowym,  $R_i \in \mathbb{N}$ . Wtedy, jako  $T_j$  oznaczymy sumaryczny czas pracy  $j$ -tego typu sensora w okresie rozliczeniowym, który jest równy:

$$T_j = \sum_{i=1}^n R_i \tau_{ij}.$$

Z kolei sumaryczny czas  $T$  pracy zestawu typów sensorów w ciągu roku jest równy:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_i \tau_{ij},$$

przy czym ma miejsce zależność: ( $T_j \leq T$ ). Dla dalszych rozważań kluczowe znaczenie ma czas  $\tau_{ij}$ . Jego wartość może być uzyskana metodami empirycznymi, można również zastosować metodę ocen ekspertowych opartą na teorii zbiorów rozmytych.

Rozważmy pierwsze z kryteriów optymalizacji systemu, którym jest *maksymalizacja obciążenia* sensorów pomiarowych. Obciążenie  $j$ -tego sensora uzyskaniem wartości  $i$ -tego parametru ekosystemu określać będziemy za pomocą czasu  $T_{ij}$  niezbędnego do wykonania koniecznych pomiarów, będącego fragmentem czasu

$T_i$ . Do celów optymalizacji można przyjąć, że  $T_{ij} = R_i$ . Wtedy funkcję  $Z$  celu możemy zapisać jako:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} / \tau_{ij} \rightarrow \max, \quad (50)$$

z uwzględnieniem następujących ograniczeń:

$$\sum_i T_{ij} \leq T_j, \quad \forall i = 1, \dots, n;$$

$$\sum_j (T_{ij} / \tau_{ij}) \leq R_i, \quad \forall j = 1, \dots, m.$$

Zauważmy, że wyrażenie (50) zapewnia maksymalizację ilości pomiarów wykonywanych przez konkretny sensor w okresie rozliczeniowym.

Zgodnie z drugim podejściem poszukiwać będziemy architektury RSMS zapewniającej *minimalizację kosztów pomiarów*. Kryterium to ma charakter ekonomiczno-techniczny, pozwala bowiem uzyskać minimalny koszt pomiaru w cyklu rozliczeniowym. Do podstawowych nośników kosztowych zaliczymy: roczny koszt  $C_j$  odtworzenia  $j$ -tego sensora pomiarowego wraz z przypadającą na niego częścią kosztów odtworzenia autonomicznego zasilania i urządzeń transmisyjnych; roczny koszt  $C_{wz}$  odtworzenia węzła zarządzającego; roczny koszt  $C_p$  dzierżawy powierzchni niezbędnych na lokalizację sensorów i węzła zarządzającego; roczne koszty  $C_e$  eksploatacji systemu włączające m. in. opłaty dzierżawne za pasma komunikacyjne oraz koszty zasilania węzła zarządzającego; koszty osobowe  $C_o$  przeznaczone na wynagrodzenia pracowników.

Jednostkowe koszty pomiaru możemy określać w dwojaki sposób. Po pierwsze, można rozważać średni koszt  $C_{avg}$  pomiaru, który określamy na podstawie wyrażenia:

$$C_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^m C_j + C_{wz} + C_p + C_e + C_o}{\sum_{i=1}^n R_i}. \quad (51)$$

Jeżeli przybliżenie kosztów oferowane przez wyrażenie (51) jest niewystarczające, w procesie optymalizacji można wykorzystywać koszt  $C_{ij}$  pomiaru  $i$ -tego parametru przez  $j$ -te urządzenie pomiarowe. Koszt ten może zostać określony na podstawie wyrażenia:

$$C_{ij} = \frac{C_j + C_{wz}^j + C_p^j + C_e^j + C_o^j}{R_{ij}},$$

gdzie:  $C_{wz}^j, C_p^j, C_e^j, C_o^j$  to koszty określone wcześniej dla wyrażenia (51) przeliczone dla  $j$ -tego sensora pomiarowego;  $R_{ij}$  – liczba pomiarów  $i$ -tego parametru przez  $j$ -ty sensor. Funkcja celu  $Z$  dla drugiego rozważanego przypadku ma postać:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \rightarrow \min, \quad (52)$$

z uwzględnieniem następujących ograniczeń:

$$\begin{aligned} \sum_i R_{ij} \tau_{ij} &\leq T_j, \quad \forall i = 1, \dots, n; \\ \sum_j n_{ij} &\leq R_i, \quad \forall j = 1, \dots, m. \end{aligned}$$

Opisana metodyka może być wykorzystana przy projektowaniu dowolnych typów RSMS. Sprzyja ona wyposażeniu systemu w zunifikowane zestawy sprzętu i metodyk pomiaru, co pozwala uzyskiwać wiarygodne rezultaty, tym samym podwyższać jakość funkcjonowania RSMS.

## 6.5. Efektywność funkcjonowania regionalnego systemu monitoringu

W celu określenia efektywności funkcjonowania RSMS wykorzystywać będziemy wskaźnik jakości jego rezultatów, oparty na takich składowych jak skuteczność funkcjonowania i oraz nakłady sprzętowo-programowe. Niech  $E$  oznacza wektorowy wskaźnik jakości funkcjonowania,  $R = (R_1, \dots, R_{n_1})$  – wektor rezultatów jego działania, a  $C = (C_1, \dots, C_{n_2})$  – wektor nakładów. Wtedy wskaźnik  $E$  może zostać przedstawiony jako  $n$ -wymiarowy wektor ( $n = n_1 + n_2$ ) postaci:

$$E = (R, C) = (R_1, \dots, R_{n_1}, C_1, \dots, C_{n_2}). \quad (53)$$

Założmy, że  $E_d = (R_d, C_d)$  zawiera akceptowalne parametry systemu, a  $E \subseteq E_d$  charakterystyki analizowanego systemu. Wtedy, jako wskaźnik efektywności funkcjonowania wykorzystamy prawdopodobieństwo  $P_{E \subseteq E_d}$  zdarzenia  $E \subseteq E_d$ , co możemy zapisać jako:

$$P_{E \subseteq E_d} = P(E \subseteq E_d). \quad (54)$$

W rozwiązaniach praktycznych, wymagania stawiane przed RSMS sprowadzają się do zapewnienia nieprzekraczalności wartości  $C_{\max}$  kosztów, przy jednoczesnym zagwarantowaniu liczby pomiarów na poziomie wyższym niż  $R_{\min}$ . Oznacza to, że:

$$E_{\min} = (R \geq R_{\min}) \cap (C \leq C_{\max}). \quad (55)$$

Probabilistyczny opis obszaru  $E_d$  sprowadza się do określenia rozkładu prawdopodobieństwa wypadkowego wektora  $E_{\min}$ . Prawdopodobieństwo  $P_c$  osiągnięcia przez system celu przy ograniczeniu wartości, wyznacza się za pomocą wzoru określającego prawdopodobieństwo całkowite:

$$P_c = P(E \subseteq E_d) = \int_{R_{min}}^{\infty} \int_0^{C_{max}} f(E_w) dR_w dC_w, \quad (56)$$

gdzie:  $f(E_w)$  – gęstość rozkładu wypadkowego wektora  $E_w$ .

Analiza rezultatów i kosztów eksploatacji rzeczywistych RSMS pozwala wysnuć wniosek, że prawdopodobieństwo osiągnięcia celu, można rozpatrywać jako iloczyn jednowymiarowych zależności pomiędzy  $R$  i  $C$ , tj.  $f(E) = f(R)f(C)$ . Tak więc:

$$P_c = \int_{R_{min}}^{\infty} \int_0^{C_{max}} f(E) dR dC = \int_{R_{min}}^{\infty} f(R) dR \int_0^{C_{max}} f(C) dC. \quad (57)$$

Na podstawie centralnego twierdzenia granicznego rachunku prawdopodobieństwa można przyjąć, że wielkości  $R$  oraz  $C$  posiadają normalny rozkład prawdopodobieństwa.

Analiza pokazała, że po wprowadzeniu zaproponowanych rozwiązań wartość oczekiwana rezultatywności systemu monitoringu rośnie, tj. krzywa gęstości przemieszcza się w prawo na osi odciętych, a wartość oczekiwana parametrów eksploatacyjnych zmniejsza się, tj. krzywa gęstości przemieszcza się na lewo na tejże osi. Wtedy, prawdopodobieństwo osiągnięcia celu  $P_c$  jako iloczyn funkcji  $f(R)$  i  $f(C)$  zwiększa się.

Powyżej przedstawiono fragment badań prowadzonych przez autorów, których celem jest stworzenie teoretycznych podstaw projektowania systemów monitoringu środowiskowego. Teoria taka, byłaby rozwinięciem teorii projektowania systemów złożonych na przykład monitoringu środowiska naturalnego.

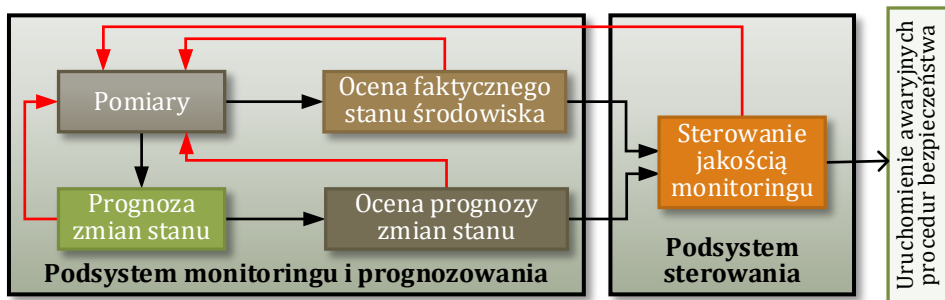


## ROZDZIAŁ 7

### Architektura bezprzewodowych systemów monitoringu

#### 7.1. Wprowadzenie

W aktach normatywnych, międzynarodowych standardach, monografiach, artykułach naukowych i innych źródłach, przedstawiono wiele alternatywnych definicji monitoringu [2], [3], [84]. Dla części autorów, monitoring jest systemem informacyjnym przeznaczonym do oceny i prognozowania zmian w środowisku, budowanym w celu oddzielenia antropogenicznej składowej jego zmian od naturalnych procesów przyrodniczych. Z racji naukowych zainteresowań autorów powyższa definicja będzie w monografii uważana za bazową. Architektura funkcjonalna systemu monitoringu środowiskowego jako systemu informacyjnego przedstawiona została na rys. 35.

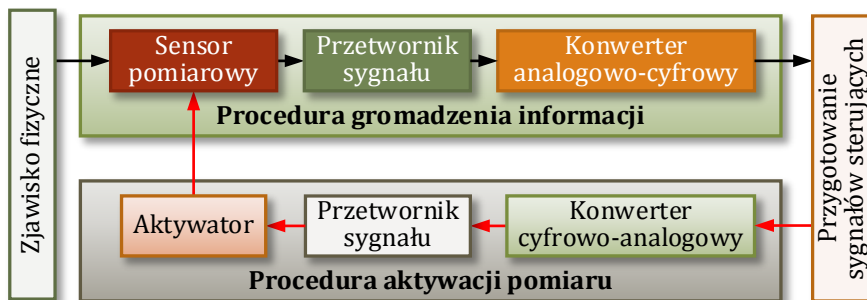


Rys. 35. Architektura systemów monitoringu środowiskowego

Oprócz permanentnego śledzenia i oceny stanu środowiska, system z rys. 35 prognozuje możliwe zmiany oraz szacuje pojawiające się zagrożenia. Częstotliwość i precyzja pomiarów są na bieżąco dostosowywane do aktualnego poziomu zagrożeń – wraz z jego wzrostem są one zwiększane. Wzrost dokładności zazwyczaj inicjują komponenty podsystemu monitoringu i prognozowania. Może być on również wymuszony przez podsystem sterowania, którego dodatkowym zadaniem jest uruchamianie awaryjnych procedur bezpieczeństwa.

Pierwszoplanową funkcją systemów monitoringu jest gromadzenie informacji o zjawiskach fizycznych zachodzących w otoczeniu. Strukturę procedury aktywacji i gromadzenia danych przedstawiono graficznie na rys. 36. *Sensor* lub *czujnik* pomiarowy to urządzenie wykorzystywane do pozyskiwania informacji o obiekcie lub procesie fizycznym, w szczególności o wystąpieniu określonych zdarzeń, takich jak zmiana temperatury, ciśnienia, wilgotności obiektu czy środowiska. *Przetwornik* to urządzenie wykorzystywane do przekształcania rodzaju energii reprezentującej informację. *Sensor* to również przetwornik zmieniający informację fizyczną w

sygnał elektryczny. Szczególnym rodzajem przetwornika są *konwertery analogowo-cyfrowe* oraz *cyfrowo-analogowe* przekształcające ciągły sygnał elektryczny (prąd lub napięcie) w dyskretny i odwrotnie [85], [86], [87].



Rys. 36. Procedury aktywacji i gromadzenia danych pomiarowych

Bazowym elementem współczesnego monitoringu jest bezprzewodowa sieć komunikacyjna o szczególnej architekturze i funkcjach, nazywana zazwyczaj siecią sensorową. Jej podstawowe zadania to: zapewnienie komunikacji pomiędzy komponentami systemu; wstępne przetwarzanie danych pomiarowych; podejmowanie decyzji w sytuacjach krytycznych. Węzły sieci sensorowej są na monitorowanym obszarze gęsto rozmieszczone. Takie rozmieszczenie narzuca architektura wykorzystywanych urządzeń bazująca na elementach o niewielkiej wydajności obliczeniowej, małym zużyciu energii i zdolnościami komunikacyjnymi rzędu 100 metrów. Uniwersalny charakter węzłów pozwala wykorzystywać je do rozwiązywania szerokiego spektrum zadań, w szczególności związanych z monitoringiem środowiska oraz sterowaniem w niedostępnych i zagrożonych obszarach. Do cech szczególnych sieci sensorowych zaliczamy także: zaawansowaną miniaturyzację; możliwość zasilania z autonomicznych źródeł; zastosowanie retranslacji do przesyłania informacji pomiędzy urządzeniami małej mocy na duże odległości; prostotę instalacji i łatwość rozbudowy, pozwalające na modyfikację sieci bez przerywania jej funkcjonowania oraz zdolność do samonaprawy i samoorganizacji [87], [88], [89], [90].

Przy projektowaniu, budowie i eksploatacji systemów monitoringu środowiska szczególną rolę odgrywają komponenty informatyczne i teleinformatyczne. Od efektywności oferowanych przez nie narzędzi informacyjno-analitycznych zależy skuteczność monitorowania i prognozowania. Zazwyczaj dostarczane informacje wykorzystywane są do poprawy skuteczności zarządzania kryzysowego. Aby zarządzanie takie było efektywne, informacje o stanie środowiska muszą być wiarygodne i pojawiać się w najkrótszym czasie od wykrycia zagrożenia [2], [89], [91].

W projektowaniu systemów monitoringu ścierają się dwie alternatywne koncepcje [2], [85], [87], [88]. Pierwsza z nich, zakłada stabilność lokalizacyjną warunków środowiskowych, których pomiar jest celem budowy systemu. Oznacza to, że źródła potencjalnych zanieczyszczeń są znane i niezmiennie. Dlatego podstawowym



kryterium rozmieszczania węzłów pomiarowych są lokalizacje źródeł zanieczyszczeń oraz sposoby ich przemieszczania w środowisku (powietrzu, wodzie lub glebie). Rozwiązanie zadania projektowego sprowadza się wtedy do lokalizacji węzłów w miejscach z maksymalną koncentracją czynników szkodliwych. Połączenie tak rozmieszczonych węzłów może być złożonym zadaniem, co jest konsekwencją terytorialnej niejednorodności lokalizacji węzłów, a sam system może być heterogeniczny komunikacyjnie. Pomimo powyższych utrudnień, z uwagi na niewielką liczbę komponentów, systemy takie są stosunkowo tanie w projektowaniu, budowie i późniejszej eksploatacji. Nie zapewniają one jednak śledzenia stanu środowiska poza wyznaczonymi wcześniej obszarami.

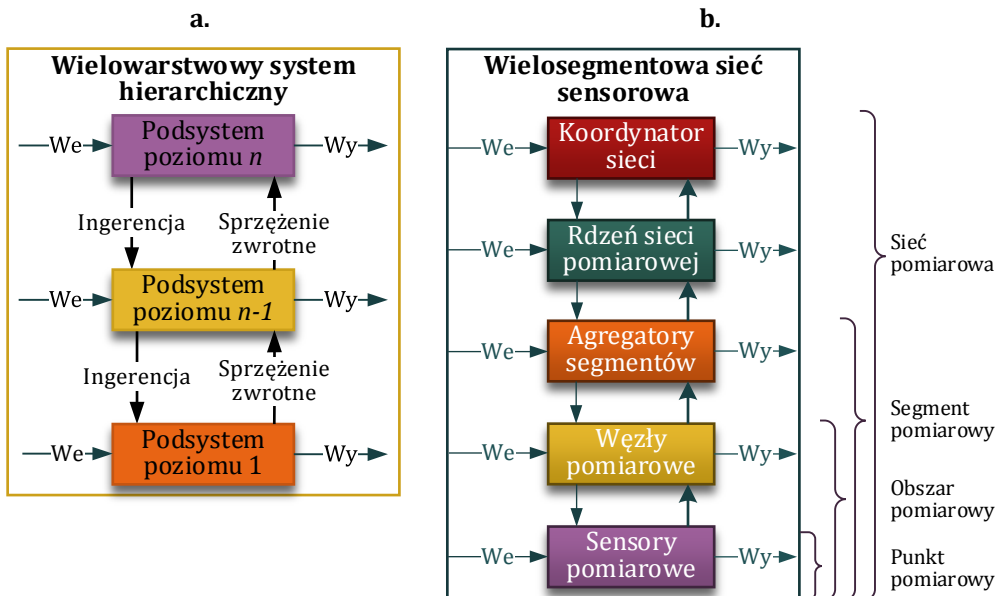
Druga strategia zakłada, że pojawienie się czynników szkodliwych jest równo prawdopodobne na całym monitorowanym obszarze i wymaga rozmieszczenia węzłów pomiarowych na całej chronionej przestrzeni. Dzięki temu, śledzi się nie tylko stacjonarne źródła zanieczyszczeń, ale również trasy przemieszczania substancji szkodliwych czy skażenia będące skutkiem działań przestępczych. Z punktu widzenia projektowania komunikacji, zadanie to jest prostsze od poprzedniego – zazwyczaj budowana jest homogeniczna sieć kratowa.

## 7.2. Hierarchiczność sensorowych sieci monitoringu

Większość współczesnych systemów informacyjnych ma organizację hierarchiczną, co komplementarnie wpływa na proces ich projektowania. Po pierwsze, hierarchiczność powoduje wzrost złożoności powiązań między komponentami, jak również ilości opisujących je parametrów i charakterystyk. Konsekwencją tego są rosnące złożoności: pamięciowa i czasowa procesu projektowania. Z drugiej jednak strony, wykorzystując metody teorii systemów hierarchicznych [92], [93], [94], proces projektowania można podzielić na prostsze, względnie niezależne etapy z akceptowalnym poziomem obu powyższych złożoności. Przykładowo, projektując hierarchiczną sieć komputerową, etapy tworzenia rdzenia i sieci dostępowych rozpatrywane są jako dwa niezależne procesy projektowe. Niestety, podział zadania na etapy, pogarsza jakość projektu – tworzone rozwiązania są nieoptymalne, wzrasta również prawdopodobieństwo wystąpienia poważnego błędu [95], [96]. Pomijając wysoką złożoność, projektowanie jednoetapowe pozwala uzyskać optymalne rozwiązanie zadania odpowiadające ciągle rosnącym oczekiwaniom użytkowników. Wymaga ono jednak wykorzystania nowych, często słabo rozpoznanych metod i środków modelowania matematycznego oraz wysokowydajnych technik przetwarzania. Najczęściej, projektowanie (także systemów hierarchicznych) bazuje na metodach będących zestawem zasad budowy zbioru elementów systemu i łączenia ich relacjami. Nie istnieje jedna uniwersalna metoda przydatna do projektowania wszelkich obiektów. Z drugiej strony, projektowanie konkretnego systemu może być zrealizowane z podobnym skutkiem, za pomocą wielu metod, różniących się wykorzystywanymi technikami analizy i syntezy [97], [98], [91], [99].

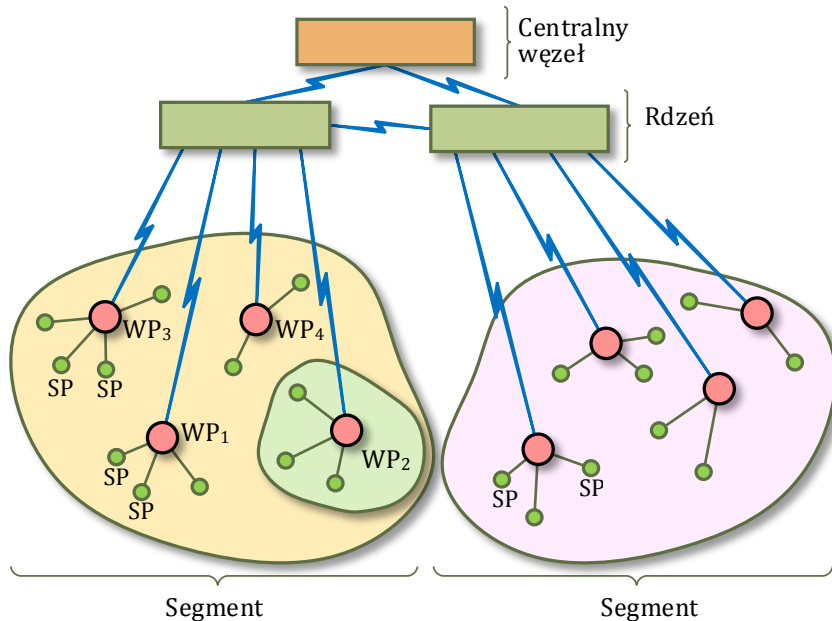
Aby zaproponować efektywne rozwiązanie zadania topologicznego projektowania sieci sensorowych, w pierwszej kolejności rozważmy ich architekturę. Sieci te są pochodną komórkowych sieci bezprzewodowych, budowanych obecnie jako wielopoziomowe architektury hierarchiczne, złożone z 3-5 poziomów komunikacyjnych [87], [90] [100], [101]. Oprócz hierarchiczności, sieci te charakteryzuje heterogeniczność, wynikająca głównie z różnorodności wymagań, stawianych przed obsługą ruchu na każdym z poziomów hierarchii. Teoretycznie można wyobrazić sobie zastosowanie do tego celu płaskiej sieci homogenicznej, jednak rozwiązanie takie nie znajduje obecnie żadnego uzasadnienia. Heterogeniczność komunikacyjna posiada wiele zalet, m. in.: zapewnia szeroki asortyment dostępnych sposobów integracji użytkownika z siecią oraz możliwość budowy na jej wyższych poziomach, wieloprotokołowych, multimedialnych systemów komunikacji. Z kolei hierarchiczność wpisuje je w główny kierunek rozwoju systemów informatycznych [102], [103], [104], [105], [106]. Jako przyczynę szerokiego rozpowszechnienia systemów hierarchicznych, zazwyczaj wskazuje się [92], [93], [103], [107]: łatwiejszą analizę rozbudowanych systemów podzielonych na mniejsze części składowe; wysoką specjalizację bloków funkcjonalnych; uproszczenie eksploatacji, konserwacji i obsługi.

Najczęściej wymienianymi cechami systemów hierarchicznych są [93]: sekwencyjne rozmieszczanie podsystemów funkcjonalnych z zachowaniem ich podległości pionowej; nadrzędność poziomów wyższych nad niższymi; zastosowanie sprzężenia zwrotnego, gwarantującego wpływ poziomów niższych na wyższe. Ogólną strukturę wielowarstwowych systemów hierarchicznych przedstawia rys. 37.a.



Rys. 37. Warstwy hierarchicznej sieci sensorowej

Na powyższym rysunku pokazano wzajemne powiązanie kolejnych warstw oraz sposób ingerencji użytkownika w ich funkcjonowanie. Korzystając z uogólnionego modelu, na rys. 37.b., zaproponowano model hierarchiczny, odwzorowujący rzeczywistą sieć sensorową. Hierarchia składa się z pięciu poziomów, z których najniższy grupuje sensory pomiarowe, najwyższy zaś zawiera centralny węzeł zarządzający, nazywany koordynatorem sieci. Elementami pozostałych poziomów hierarchii są: węzły pomiarowe, agregatory segmentów oraz rdzeń sieci pomiarowej. Przykład sieci funkcjonującej zgodnie z powyższym modelem przedstawiono na rys. 38.



Rys. 38. Architektura hierarchicznej sieci sensorowej. Oznaczenia: WP – węzeł pomiarowy, SP – sensor pomiarowy

Na najniższym poziomie modelu rozmieszczone są sensory pomiarowe, najczęściej powiązane z węzłem pomiarowym za pomocą metod przewodowych. Wykorzystując technologię RFID można integrować sensory z siecią również bezprzewodowo, jednak z uwagi na moc zużywaną przez sensor w trakcie pomiaru i komunikacji, rozwiązanie takie stosowane jest rzadziej. Lokalizacja urządzenia pomiarowego nazywana jest punktem pomiarowym. Ilość czujników dołączanych do węzła jest uwarunkowana jego architekturą i standardowo nie przekracza kilku. Dodatkowym ograniczeniem liczby sensorów może być także moc zasilania, którą dysponuje węzeł. Teren, na którym lokalizuje się sensory dołączone do tego samego węzła, nazywa się obszarem pomiarowym. Węzły łączone są w segmenty pomiarowe za pomocą agregatorów segmentów. Urządzenia te, oprócz większej mocy obliczeniowej, dysponują szerokim zestawem interfejsów zewnętrznych słu-

jących do budowy rdzenia sieci. Koordynator sieci to rozbudowana jednostka, której podstawowym zadaniem jest zapewnienie komunikacji zewnętrznej dla całej sieci pomiarowej. Zadaniem koordynatora może być również integracja agregatorów w ramach rdzenia sieci pomiarowej.

### 7.3. Zadanie projektowania hierarchii

Zgodnie z teorią systemów hierarchicznych [108], [109], [110], każdy z poziomów hierarchii może mieć postać straty, warstwy lub eszelonu. Rozróżnienie trzech różnych organizacji warstw wynika z poszukiwania kompromisu pomiędzy prostotą opisu a złożonością wzajemnych powiązań. Rzeczywiste systemy są najczęściej skomplikowaną kombinacją powyższych typów podstawowych, a sposób przedstawienia hierarchii zależy od architektury systemu.

*Strata* jest poziomem dysponującym własnym opisem funkcjonowania, dzięki czemu analizując system możemy ograniczyć się do analizy interesującej nas warstwy. Model systemu, którego poziomy mają postać strat, nazywany jest modelem stratyfikowanym, a sam system – systemem stratyfikowanym. Charakteryzuje je wysoka niezależność strat, dzięki czemu możliwe staje się precyzyjne określenie jego właściwości, które są superpozycją funkcji poszczególnych strat. W pierwszym przybliżeniu, bezprzewodowe sieci monitoringu można traktować jako systemy stratyfikowane, jednak w systemach rzeczywistych absolutna niezależność strat nie występuje, a opis ich funkcjonowania musi uwzględniać wszystkie wykorzystywane straty, jak również powiązania pomiędzy nimi.

Do rozwiązania realnego zadania poszukiwania optymalnej hierarchii, możemy wykorzystać metody programowania całkowitoliczbowego [111], [112], [113]. W tym celu, rozważmy zbiór  $G$  grafów dopuszczalnych hierarchii  $G = \{G_1, \dots, G_n\}$ , gdzie:  $i = 1, \dots, n$ . Załóżmy, że poszukujemy hierarchii opisanej grafem  $G^* \in G$ , charakteryzującej się maksymalną wartością oceny wybranej właściwości lub ich zestawu. W tym celu, analizować będziemy wektor  $\Psi$  cząstkowych wskaźników efektywności grafu  $G_{i_1} \in G_i$ , określony jako:

$$\Psi(G_{i_1}) = (\psi_1(G_{i_1}), \dots, \psi_k(G_{i_k}), \dots, \psi_m(G_{i_m})).$$

Wtedy, funkcja celu będzie miała postać:

$$\max_{G^* \in \{G_i\}} \psi_k(G^*), \quad \forall k = 1, \dots, m. \quad (58)$$

Można poszukiwać także hierarchii najbardziej zbliżonej do określonej wcześniej struktury wzorcowej lub ich zbioru. Jako  $G_C = (V_C, E_C)$  oznaczmy graf docelowej (wzorcowej) hierarchii, przy czym  $G_C \in \{G_i\}$ . W celu określenia odległości wybranego grafu od grafu docelowej hierarchii, wprowadzimy funkcję bliskości  $\rho$ . Dla dwóch dowolnych grafów  $G_{i_1}$  oraz  $G_{i_2}$  należących do zbioru dopuszczalnych hierarchii (tj.  $G_{i_1}, G_{i_2} \in \{G_i\}$ ), funkcja  $\rho(G_{i_1}, G_{i_2})$  określa bliskość pomiędzy nimi. Tak więc, funkcja celu przyjmuje postać:

$$\min_{G^* \in \{G_j\}} \rho(G^*, G_c) \quad (59)$$

Wykorzystując zintegrowaną definicję zadań (58) oraz (59), dla  $\psi_k(G^*) \geq r_k$ ,  $\forall k = 1, \dots, m$ , nową funkcję celu możemy zapisać jako:

$$\min_{G^* \in \{G_j\}} \rho(G^*, G_c) \quad (60)$$

gdzie:  $r_k$  – ograniczenia wartości ocenianych właściwości.

Powyższe zadania optymalizacyjne odpowiadają złożonym modelom programowania całkowitoliczbowego lub mieszanego całkowitoliczbowego, do rozwiązania których można wykorzystać różnorodne metody: od prostego przeszukiwania począwszy, na metodach sztucznej inteligencji skończywszy [112], [113], [114].

Zadanie określenia liczby i typów poziomów sieci może być przedstawione również jako zadanie rozmieszczania wielopoziomowego, a do uzyskania przybliżonego wyniku można zastosować metodę bazującą na liniowej relaksacji i rozwiązaniu zadania dualnego z lokalną poprawą wyniku. Jeżeli niezbędne jest dokładne rozwiązanie, można zastosować metodę gałęzi i granic. Kiedy na strukturę projektowanej sieci nakładane są dodatkowe ograniczenia, należy zastosować metody: poszukiwania drzewa rozpinającego z ograniczonym promieniem; budowy optymalnego drzewa Steinera z limitowanymi długościami ścieżek i ograniczoną ilością punktów Steinera oraz poszukiwania prostokątnego drzewa Steinera ze ścieżkami jednakowej długości [89], [115], [90]. Niestety, wszystkie powyższe metody należą do grupy algorytmów NP-zupełnych i są nieprzydatne do szybkiego rozwiązania zadania. Inną grupą metod, przydatnych do określenia efektywnej hierarchii jest klasteryzacja hierarchiczna, w szczególności wywodzące się z niej: metoda aglomeracyjna [116], [117] oraz metoda hierarchiczna z przecinaniem klastrów [118].

#### 7.4. Topologie sieci monitoringu

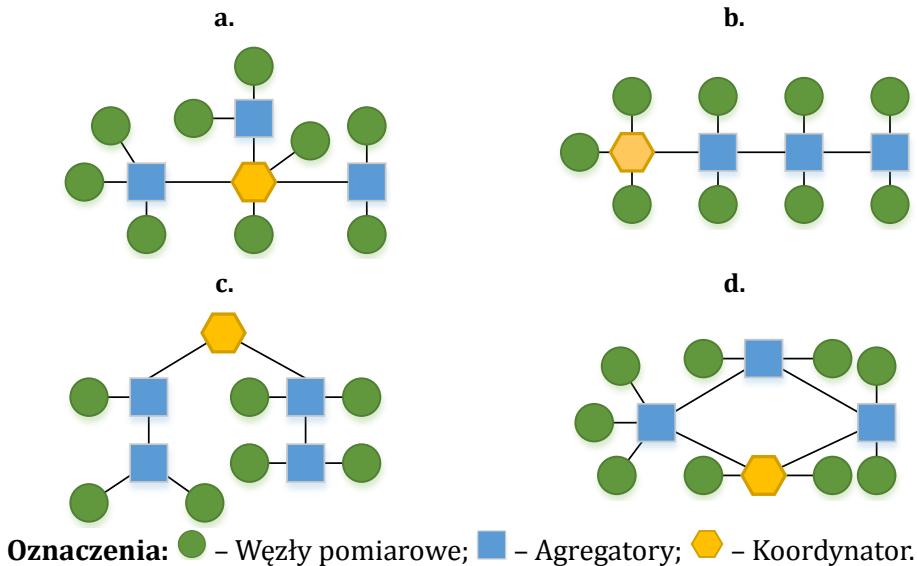
Współczesne sensorowe sieci monitoringu można budować jako struktury jednościeżkowe z jedną trasą, łączącą węzeł pomiarowy z koordynatorem sieci oraz wielościeżkowe z trasami alternatywnymi, wiążącymi węzeł nadawczy i odbiorczy. Trasy te mogą być zarówno jedno- jak i wieloskokowe. W architekturze *jednoskokowej*, węzeł pomiarowy łączy się bezpośrednio z koordynatorem sieci, co w przypadku większych odległości pochłania znaczną energię na realizację komunikacji, zarówno od strony węzła pomiarowego, jak i koordynatora. Jeżeli zastosowanie ścieżek jednoskokowych jest obligatoryjne (np. kiedy struktura pomiarowa musi być płaska), węzeł pomiarowy wyposaża się w odnawialne źródło energii, ewentualnie minimalizuje wykonywane w nim operacje obliczeniowe. Z uwagi na swoje ograniczenia architektury jednoskokowe wykorzystywane są stosunkowo rzadko.

W jednościeżkowej architekturze wieloskokowej, dane od węzła pomiarowego do odbiorczego przechodzą przez wiele węzłów pośrednich, jednak trasa ich przesyłania jest absolutnie jednoznaczna, a marszrutyzacja nie jest wymagana. Dzięki komunikacji wieloskokowej odległości, na które w każdym skoku przesyłana jest

informacja są ograniczane, co sprzyja minimalizacji niezbędnej mocy zasilania każdego z węzłów. Również wymagania energetyczne stawiane przed koordynatorem sieci są łatwiejsze do spełnienia: chociaż główne węzły sieci są z zasady wyposażane w odnawialne źródło energii, to minimalizacja zapotrzebowania energetycznego sprzyja wydłużeniu czasu eksploatacji urządzeń zasilających. Istotną wadą rozwiązań jednościeżkowych (zarówno jedno- jak i wieloskokowych) jest niska odporność na uszkodzenia: awaria chociażby jednego węzła na trasie przesyłania danych powoduje jej niespójność. Pomimo tego, sieci takie są z uwagi na niski koszt stosowane bardzo szeroko.

Architektura sieci *wieloskieżkowej* zakłada, że dane pomiędzy węzłem pomiarowym a głównym agregatorem mogą być przesyłane za pomocą wielu alternatywnych ścieżek. Dlatego każdy z węzłów pośrednich, przez które przesyłane są dane, musi posiadać możliwość ich marszrutyzacji (trasowania). W efekcie węzły są bardziej rozbudowane, ich cena i zużywana moc jest wyższa. Jako węzły routujące wykorzystywane są przede wszystkim agregatory.

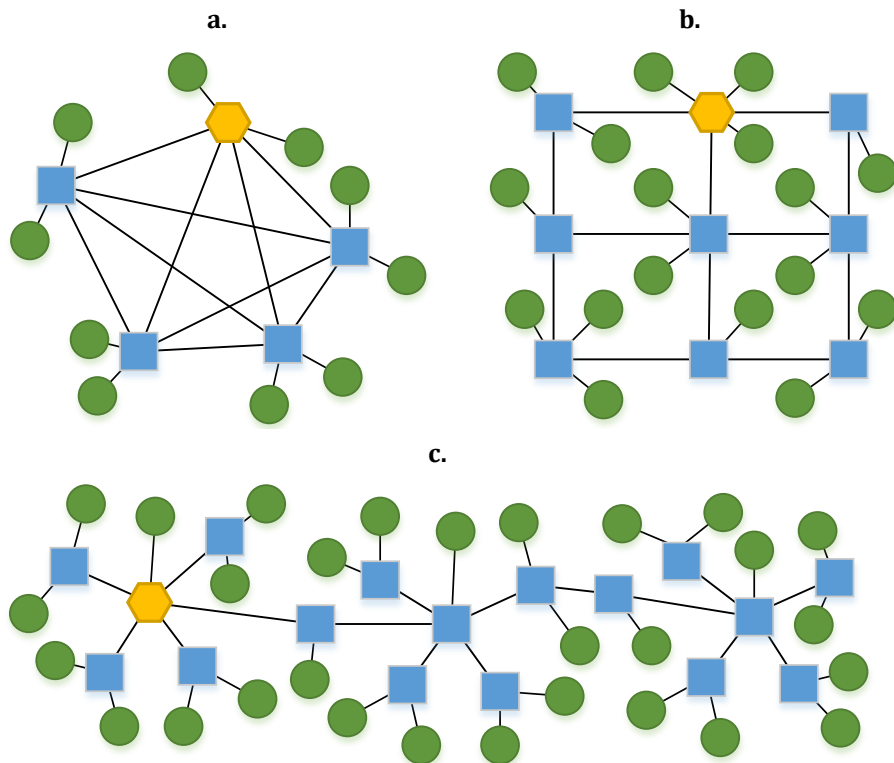
Przykłady trzech podstawowych jednościeżkowych topologii sieci sensorowych oraz jednej wieloskieżkowej zostały przedstawione na rys. 39.



Rys. 39. Proste topologie sieci sensorowych: a. Gwiazda; b. Magistrala; c. Drzewo; d. Pierścień

W topologiach z rysunków a., b. oraz c. dla dowolnej pary wierzchołków istnieje tylko jedna łącząca je ścieżka. W topologii pierścieniowej (rysunek d.) każdy z agregatorów może być dołączony do koordynatora za pomocą dwóch alternatywnych ścieżek. Topologie zaprezentowane na rys. 39 znajdują zastosowanie w niewielkich sieciach monitoringu. Jeżeli śledzony obszar oraz liczba węzłów pomiarowych

są większe, najczęściej wykorzystywane są drzewo klastrowe, krata oraz sieć bazująca na gęstym rdzeniu. Sieci te zostały zaprezentowane schematycznie na rys. 40. Choć składają się one ze znacznie większej liczby węzłów i połączeń, koncepcje ich budowy zostały zaczerpnięte z prostych topologii sieci sensorowych.



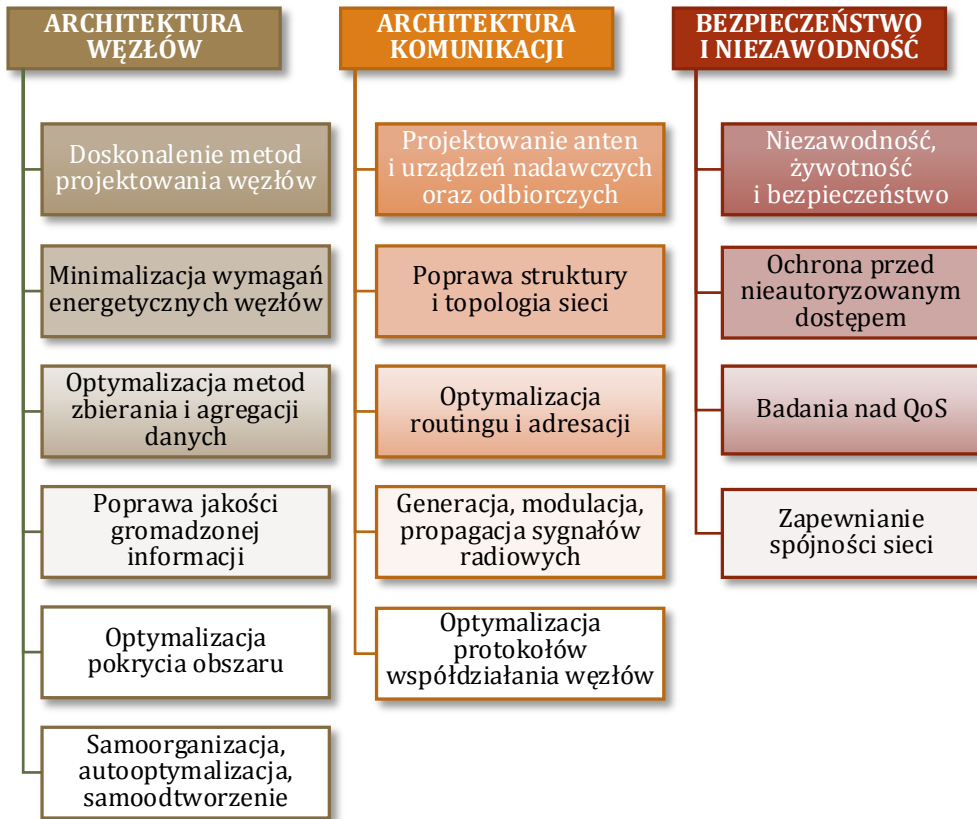
Rys. 40. Topologie rozbudowanych sieci sensorowych: a. Topologia z pełnym rdzeniem; b. Topologia kratowa; c. Topologia drzewa klastrowego

## 7.5. Problemy eksploatacyjne sieci sensorowych

Pomimo tego, iż sieci sensorowe rozwijane są już od dwóch dekad, stan wiedzy o ich projektowaniu jest nadal niezadowalający. Tworząc sieci tej klasy można bazować na bogatym doświadczeniu projektowania sieci teleinformatycznych. Choć dla sieci tych, metody formalne pozwalające jednocześnie analizować wszystkie aspekty ich funkcjonowania nie istnieją, to algorytmy cząstkowe, rozwiązujące zadanie projektowe dla wybranego obszaru funkcjonalnego pozwalają uzyskiwać zadowalające efekty. Jednak ich wykorzystanie do projektowania sieci sensorowych jest bardzo ograniczone. Analizowane sieci to systemy złożone, na których funkcjonowanie przejawia wpływ wiele czynników, nieobecnych lub pomijanych w sieciach teleinformatycznych. Przykładowo, w sieciach sensorowych zużycie energii przez węzły jest krytyczne i należy je minimalizować. W sieciach teleinformatycznych, energia zużywana przez węzły komunikacyjne jest znikomą częścią mocy

wymaganej do zasilania węzłów obliczeniowych, w szczególności realizujących zadania wyszukiwania informacji. Dlatego niezbędne jest opracowanie i weryfikacja nowych metod analizy i syntezy sieci tej klasy.

Na rys. 41 sklasyfikowano najważniejsze problemy badawcze pojawiające się przy projektowaniu sieci sensorowych. W dalszej części rozdziału skoncentrujemy się na analizie kilku wybranych.



Rys. 41. Aktualne obszary badawcze dla sieci sensorowych

Węzły pomiarowe sieci sensorowych często rozmieszczone są w odległych i trudnodostępnych miejscach. Najczęściej, nie ma możliwości zasilania ich z sieci energetycznej, a *Ustawa o ochronie przyrody*, ze względów krajobrazowych nie zawsze dopuszcza wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (generatorów wiatrowych, paneli fotowoltaicznych). Tak więc, znaczna część węzłów sieci musi być zasilana z wbudowanych baterii lub akumulatorów, a niezbędna moc zasilania staje się jednym z podstawowych parametrów węzłów.

W węzłach sieci sensorowej energia jest zużywana na wykonanie operacji pomiarowych, obliczeniowych i komunikacyjnych. Szacuje się, że przesłanie informacji o objętości 1kB na odległość 100 m, wymaga w sieciach sensorowych podobnej



energii jak wykonanie 3 milionów operacji stałopozycyjnych przez procesor o wydajności 100 MIPS. Podobnie jak większość urządzeń techniki komputerowej, procesory węzłów sieci sensorowych wykonane są w technologii CMOS, w której znakomitą część zużywanej energii pochłaniają przełączanie stanu układów logicznych oraz upływności. Dla procesorów energię tę można zapisać w uproszczonej formie jako:

$$E_{CPU} = E_p + E_U = C_T U_Z^2 + U_Z I_U t, \quad (61)$$

gdzie:  $E_p$  – energia przełączania stanów logicznych;  $E_U$  – energia upływności;  $C_T$  – całkowita pojemność przełączanych obwodów elektronicznych;  $U_Z$  – napięcie zasilania;  $I_U$  – prąd upływności;  $t$  – czas wykonania operacji. Zauważmy, że wraz ze wzrostem częstotliwości pracy procesora, tracona moc wzrasta. We współczesnych procesorach sieci sensorowych, moc tracona na przełączanie obwodów stanowi połowę zużywanej przez układ energii.

Z teorii propagacji fal radiowych wiadomo, że moc odbieranego sygnału radiowego względem wysyłanego spada w kwadracie odległości, tj.:  $P_O \sim P_W / d^2$ , gdzie:  $P_O$  – moc sygnału odebranego przez agregator;  $P_W$  – moc sygnału radiowego wysłanego przez węzeł pomiarowy;  $d$  – odległość fizyczna pomiędzy agregatorem i węzłem pomiarowym. Dlatego podstawowym sposobem oszczędzania energii w sieciach sensorowych jest ograniczanie odległości pomiędzy komunikującymi się węzłami, zarówno na etapie projektowania poprzez podział większych odległości na fragmenty, jak i efektywnego wyboru trasy przesyłania danych, uwzględniającego niezbędną i dostępną w węzłach energię.

Innym efektywnym sposobem ograniczenia zużycia energii jest w sieciach sensorowych wprowadzanie węzłów w stan uśpienia w sytuacji, kiedy pomiary nie są wykonywane lub kiedy ich wyniki nie muszą być przesyłane poza węzeł pomiarowy. Do ograniczenia zużywanej energii przyczynia się również rozdzielenie kanałów radiowych wykorzystywanych do przekazywania danych oraz aktywowania urządzenia.

Istotną właściwością sieci sensorowych jest autonomia zarządzania przejawiająca się ich samorganizacją, autooptymalizacją i samoodtworzeniem. Zauważmy, że sieci tej klasy często są instalowane w niedostępnych okolicach, gdzie możliwości obsługi i ewentualnej naprawy są znikome. Dlatego, sieci te powinny posiadać możliwość konfiguracji, współdziałania z sąsiednimi węzłami oraz adaptacji warunków funkcjonowania do pojawiających się uszkodzeń bez udziału operatora. *Samooorganizacja* sieci pozwala jej automatycznie dobierać parametry swojego funkcjonowania. Przykładowo, węzeł sieci powinien szacować minimalną moc emisji sygnału radiowego zapewniającą niezawodne połączenie z sąsiednim węzłem. *Autooptymalizacja* opierając się na obserwacji poziomu wykorzystania zasobów pozwala dostosowywać ich wykorzystanie do potrzeb użytkownika i możliwości systemu. Dzięki funkcji *samoodtworzenia* sieć może reagować na zmiany w dostępności jej komponentów wprowadzając modyfikacje zapewniające jej poprawne funkcjonowanie.

Dodatkowo badania powinny być prowadzone w obszarach związanych z wykorzystaniem sensorowych sieci monitoringu. Prace mogą dotyczyć zarówno opracowania nowych metod analizy wyników pomiarów, jak również doskonalenia istniejących czujników pomiarowych.

## ROZDZIAŁ 8

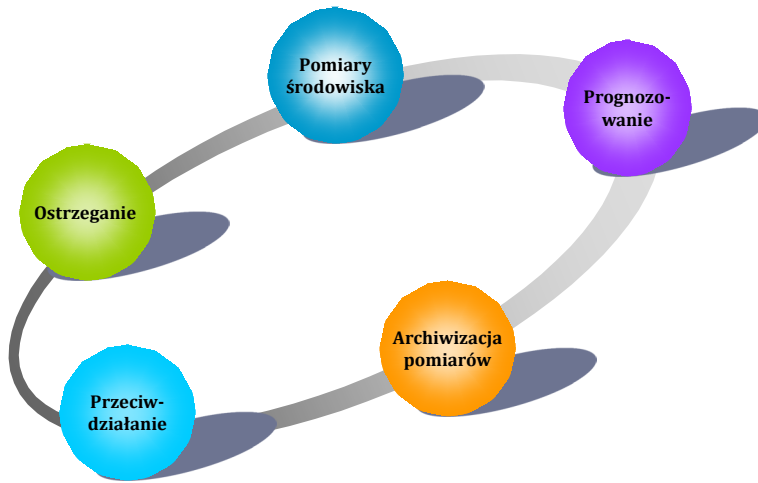
### Programowo-sprzętowe komponenty monitoringu środowiskowego

#### 8.1. Wprowadzenie

Informacja jest dobrem, którego wartość trudno przecenić. Wszystkie współczesne potęgi gospodarcze zbudowały swój dobrobyt na bazie szerokiego dostępu do informacji. Informatyka, która jak sama jej nazwa wskazuje zajmuje się informacją, wkracza w coraz to nowe, nieznane jej dotąd, obszary życia. O ile wcześniej gromadzone, przetwarzane i udostępniane były informacje usprawniające kontakt osoby z przedsiębiorstwem czy urzędem, to obecnie dystrybuowane mogą być również dane dotyczące bezpieczeństwa osób zamieszkałych na obszarze, na którym pojawiają się różnorodne zagrożenia. Jednak sama informatyka nie dysponuje metodami i środkami pozwalającymi skutecznie poprawiać bezpieczeństwo obywateli. W tym celu wspomaga się ona takimi dyscyplinami naukowymi jak: meteorologia, klimatologia, telekomunikacja, metrologia i in. W rezultacie, informacja o możliwym zagrożeniu dociera do zainteresowanych osób z pewnym wyprzedzeniem, a jej wiarygodność jest wysoka.

Wieloletnie badania prowadzone w Wyższej Szkole Informatyki i Zarządzania pokazały, że jedną z wartości najwyższej cenionych przez mieszkańców Podkarpacia jest poczucie bezpieczeństwa. Badania te potwierdziły również, że ankietowane osoby, zagrożenia wywoływane przez siły przyrody postrzegają na równi z zagrożeniami związanymi z przestępczością, utratą pracy, czy ciężką chorobą. Powszechnie wiadomo, że poczucie zagrożenia nie sprzyja efektywnej pracy i wypoczynkowi. Ponadto, każdy inwestując swój kapitał chciałby mieć pewność, że o ewentualnych zagrożeniach zostanie poinformowany na tyle wcześnie, aby podjąć działania minimalizujące ewentualne straty. Niestety, ostatnie lata pokazały, że wspomniane poczucie bezpieczeństwa zakłócają zjawiska naturalne, które pojawiają się coraz częściej i charakteryzują się niespotykaną dotąd siłą. Dlatego, badania naukowe, które przez całą historię ludzkości ukierunkowane były na poprawę naszego dobrobytu powinny objąć również i te zagadnienia [1].

Efektorem prac prowadzonych przez Wyższą Szkołę Informatyki i Zarządzania jest opracowanie aktywnego systemu monitoringu środowiskowego wykorzystującego najnowsze rozwiązania z obszaru informatyki, hydrologii, meteorologii, zarządzania i telekomunikacji. Na rys. 42 przedstawiono obejmowany przez niego obszar funkcjonalny.

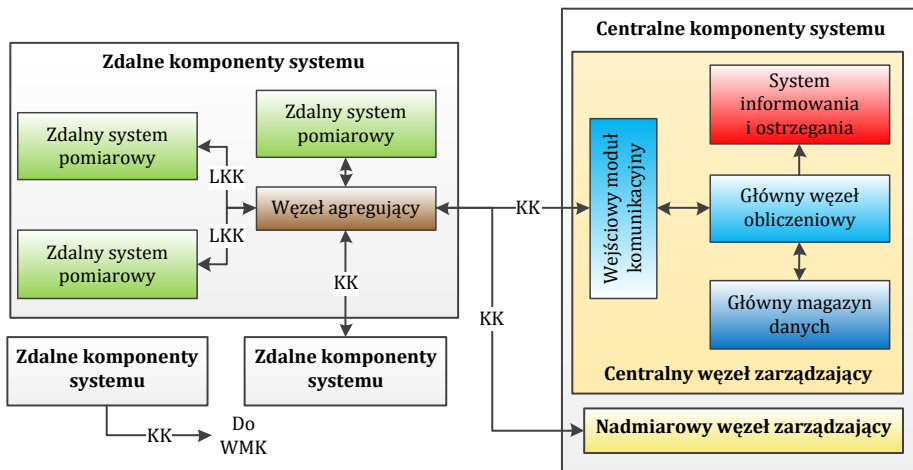


Rys. 42. Zakres funkcjonalny działania system monitorowania środowiska

Działanie tradycyjnego systemu monitoringu ogranicza się do pomiarów charakterystyk środowiska, które przekazywane są do centrum zarządzania i tam analizowane metodami intuicyjnymi [119], [120], [82]. W omawianym systemie, na bazie aktualnych pomiarów i danych historycznych generowane są zarówno prognozy bieżące, jak i długoterminowe. Pierwsze, uzyskiwane są za pomocą udoskonalonych modeli hydrologicznych wykorzystujących aktualne parametry środowiska. Do opracowania prognoz długoterminowych zastosowanie znajdują metody sztucznej inteligencji. Dodatkową funkcją systemu jest również przeciwdziałanie zagrożeniom w systemach hydrologicznych posiadających zbiorniki retencyjne lub różnego typu obszary zalewowe. Może on również przygotowywać zbiorniki wodne do magazynowania nadmiaru wody, bądź gromadzić jej zapasy na wypadek suszy. Ostatnią, nową funkcją systemu jest ostrzeżenie podmiotów o zagrożeniach, które realizowane jest automatycznie, a udział człowieka ogranicza się wyłącznie do nadzoru. Poniżej prezentujemy architekturę systemu.

## 8.2. Architektura systemu

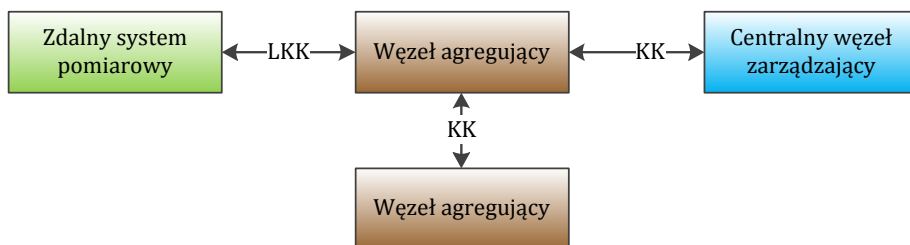
*System monitorowania zagrożeń środowiskowych (SMZS)* jest złożoną konstrukcją programowo-sprzętową opartą na najnowocześniejszych rozwiązaniach technicznych, której uproszczona struktura funkcjonalna została przedstawiona na rys. 43.



Rys. 43. Struktura funkcjonalna systemu monitorowania zagrożeń środowiskowych. Oznaczenia: LKK – lokalny kanał komunikacyjny; KK – kanał komunikacyjny; WMK – wejściowy moduł komunikacyjny

Komponenty systemu możemy podzielić na *zdalne*, nazywane także wyniesionymi, oraz *centralne*. Podstawowymi komponentami zdalnymi są: *zdalny system pomiarowy* (ZSP) oraz *węzły agregujące* (WA). Moduł ZSP przeznaczony jest do lokalnego zbierania informacji o środowisku i przekazywania ich, za pośrednictwem węzła agregującego, do *centralnego węzła zarządzającego* (CWZ) oraz *nadmiarowych węzłów zarządzających* (NWZ). Zarówno ZSP jak i WA są zlokalizowane bezpośrednio na monitorowanym obszarze. Zgodnie z obowiązującymi tendencjami, system pomiarowy oparty jest na hierarchicznej sieci sensorowej o architekturze gwiazdистой lub kratowej. W terminologii sieci sensorowych ZSP obsługiwany będzie przez kolektory danych, węzeł agregujący nazywany jest agregatorem danych [121], [79], [122].

Organizacja hierarchii komunikacyjnej SMZS przedstawiona została na rys. 44.



Rys. 44. Hierarchia komunikacyjna systemu monitorowania zagrożeń środowiskowych

Komunikacja pomiędzy zdalnym systemem pomiarowym a głównym węzłem zarządzającym odbywa się za pośrednictwem węzła agregującego. W proponowanym rozwiązaniu, lokalny kanał komunikacyjny realizowany jest za pomocą bazującej na standardzie sieci bezprzewodowej IEEE 802.15 technologii ZigBee [121].

W tym konkretnym przypadku, transmisja odbywać się będzie w paśmie 868 MHz. Z praktycznego punktu widzenia, ograniczenie liczby ZSP dołączanych do węzła agregującego za pomocą LKK nie ma żadnego znaczenia – możliwości techniczne WA są znacznie większe od rzeczywistych potrzeb.

Ponieważ węzły agregujące rozmieszczone są zazwyczaj w większej odległości, nierzadko w terenie trudnym komunikacyjnie, asortyment obsługiwanych technologii bezprzewodowych jest dość szeroki: począwszy od opartych na standardzie IEEE 802.15, przez połączenia Wi-Fi realizowane na bazie sieci bezprzewodowych IEEE 802.11, po pakietowe przesyłanie danych GPRS. We wszystkich powyższych sposobach wykorzystuje się stos protokołów TCP/IP. Dostępne są również interfejsy przewodowe Ethernet i DSL. Chociaż niezbędne połączenie WA↔CWZ może być realizowane w dowolny sposób pod warunkiem, że spełnione będą wymagania komunikacyjne oraz kosztowe, to z uwagi na niewielki zasięg, technologie standardu 802.15 nie są do tego przydatne [122].

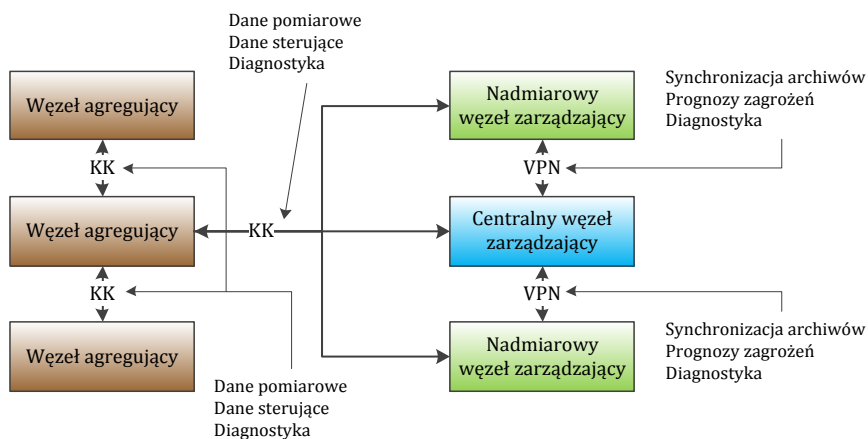
Najczęściej wykorzystywana jest heterogeniczna sieć hierarchiczna, na dolnym poziomie której wykorzystuje się technologię IEEE 802.15 łączącą koncentratory danych z agregatorami. Dalej, za pomocą kanałów opartych na jednym ze standardów 802.11 buduje się sieć kratową złożoną ze wzajemnie połączonych węzłów agregujących. Następnie, z jednego spośród WA, przy pomocy usługi GPRS w trybie *logowania użytkownika do korporacyjnej sieci LAN*, realizuje się połączenie z centralnym oraz nadmiarowymi węzłami zarządzającymi. W celu poprawy żywotności można zastosować również heterogeniczne ścieżki komunikacyjne, których elementem, oprócz kanału GPRS, będzie dedykowany kanał sieci globalnej. Jeżeli wejściowy moduł komunikacyjny CWZ jest skalowalny i może być elastycznie rekonfigurowany, oferowany system może zostać wyposażony w dowolną liczbę zdalnych komponentów, dołączanych za pomocą każdego z wymienionych wcześniej sposobów.

Ponieważ wszelkie prognozy, proces decyzyjny oraz informowanie podmiotów wykonywane jest przez CWZ, to w celu zagwarantowania wymaganego poziomu dostępności węzeł ten jest dublowany zarówno ze sprzętowego jak i programowego punktu widzenia. W szczególności opracowanie prognoz oraz długoterminowe przechowywanie danych wykonywane jest jednocześnie w kilku, najczęściej dwóch, niezależnych węzłach zarządzających. W proponowanej architekturze zakłada się wykorzystanie jednego nadmiarowego węzła zarządzającego (NWZ) zlokalizowanego w Centrum Edukacji Międzynarodowej (CEM) Wyższej Szkoły Informatyki i Zarządzania. W systemie przewidziano możliwość podwyższenia poziomu redundancji.

Jeżeli funkcjonowanie CWZ zostaje zakłócone, jego rolę przejmuje NWZ, który czasowo uzyskuje status centralnego węzła. Jeżeli poprawne funkcjonowanie pierwotnego CWZ zostaje przywrócone, początkowo jest on dołączony do systemu jako węzeł nadmiarowy, a po upływie tzw. *czasu karencji*, zmniejszającego możliwość ponownego odłączenia, ponownie uzyskuje on status CWZ. Procedura dołączenia

dowolnego węzła nadmiarowego rozpoczyna się od synchronizacji danych, przy czym, w celu ograniczenia rozmiaru komunikacji międzywęzłowej realizowana jest ona od ostatniego dostępnego w obu węzłach punktu kontrolnego. Punkty kontrolne tworzone są okresowo w momencie, kiedy monitorowane zagrożenia są minimalne. Czynnikiem wyzwalającym może być czas lub poziom zmian wprowadzonych do archiwum.

Połączenie CWZ z węzłami nadmiarowymi realizowane jest za pomocą sieci Internet, w szczególności na bazie zestawionych z jej wykorzystaniem kanałów VPN. Kanały te, oprócz synchronizacji archiwów, wykorzystywane są do diagnostyki oraz przesyłania prognoz zagrożeń generowanych dodatkowo w węzłach nadmiarowych. Poziom współdziałania węzłów nadmiarowych z CWZ zależy od trybu pracy systemu. W oferowanej wersji system działa w trzech podstawowych trybach: **a. standardowym**; **b. alarmowym** oraz **c. katastrofy**. Relacje komunikacyjne pomiędzy węzłem agregującym oraz węzłami CWZ i NWZ przedstawiono na rys. 45.



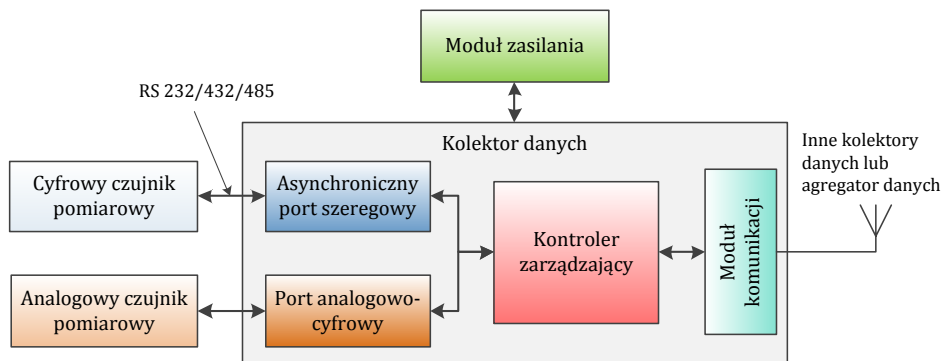
Rys. 45. Współdziałanie informacyjne węzłów agregujących oraz centralnego i nadmiarowego węzła zarządzającego

W trybie *standardowym* rola węzła nadmiarowego ogranicza się do archiwizacji danych pomiarowych oraz okresowego diagnozowania stanu CWZ. W pozostałych trybach NWZ dubluje obliczenia wykonywane w CWZ. Jeżeli na podstawie tych samych algorytmów i danych wejściowych uzyskane zostały różne prognozy, system przełącza się w tryb diagnostyki, którego zadaniem jest określenie przyczyny pojawienia się różnic. Wykryty niesprawny węzeł jest eliminowany z systemu. Główny magazyn danych (GMD) przechowuje przesłane dane o stanie środowiska i prognozy sporządzone na ich podstawie. Powyższe informacje chronione są dodatkowo w NWZ. Jak zaznaczono wcześniej, w trybie *alarmowym*, kiedy zagrożenie staje się prawdopodobne, NWZ rozszerza swoje działanie o prognozowanie zmian stanu środowiska.

Jeżeli w trakcie funkcjonowania systemu, następuje dalsze uprawdopodobnienie zagrożenia, przechodzi on do trybu *katastrofy*. W sytuacji, kiedy opracowana prognoza wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo lub nieuchronność pojawienia się zagrożenia uruchamiany jest system informowania i ostrzegania (SIO), który rozsyła do wszystkich osób znajdujących się na zagrożonym obszarze komunikaty głosowe lub tekstowe. Moduł SIO aktywizuje się już przy przejściu SMZS do trybu alarmowego. Jednak w tym przypadku, komunikaty rozsyłane są wyłącznie do służb odpowiedzialnych za działania ratunkowe. Z uwagi na koszty, nadmiarowe węzły zarządzające nie posiadają modułu informowania i ostrzegania.

### 8.3. Zdalny system pomiarowy

Zadaniem ZSP jest wykonanie pomiaru interesującej nas wielkości fizycznej i przekazanie jej wartości do węzła agregującego. System nie przewiduje ograniczeń typów czujników pomiarowych, tj. mierzona może być praktycznie każda wielkość fizyczna, do pomiaru której dostępny jest czujnik. Struktura funkcjonalna ZSP przedstawiona została na rys. 46.



Rys. 46. Struktura zdalnego systemu pomiarowego

Najważniejszym elementem ZSP jest *kolektor danych*. Jest to autonomiczne, programowalne urządzenie mikroprocesorowe, wyposażone w interfejsy sterujące służące do przekazywania komend sterowania urządzeniom zewnętrznym, których zadaniem jest wykonanie określonych działań, przesłanie odpowiednich komunikatów lub zainicjowanie procedur wykonywanych przez inne systemy. Kolektory komunikują się pomiędzy sobą bezprzewodowo, przy użyciu kanałów w pasmach 868 MHz, 915 MHz oraz 2.4 GHz. Zasięg transmisji radiowej jest uzależniony od lokalizacji kolektora, ukształtowania terenu, zastosowanego pasma oraz parametrów propagacji sygnału i wynosi zwykle od kilkudziesięciu metrów do około 1 km. Prędkość transmisji danych zależy również od wykorzystywanego pasma i wynosi od kilku do kilkuset kbit/s [121], [79], [122].

Zasilanie ZSP może być realizowane w dwojaki sposób. Po pierwsze, z uwagi na niski pobór mocy, wynikający z zastosowania trybu hibernacji kolektora, może być



on zasilany z baterii, której czas działania jest nie mniejszy niż kilkanaście miesięcy. Jeżeli pobór mocy jest większy, co może wynikać z rodzaju zastosowanych czujników, dla zapewnienia autonomii urządzenia wykorzystuje się akumulatory ładowane z ogniw fotowoltaicznych. Wybór konkretnego sposobu zasilania zależy od rodzaju zastosowanego czujnika pomiarowego, lokalizacji, a dokładniej fizycznej dostępności kolektora, częstości wykonywania operacji pomiarowych i komunikacyjnych. W proponowanym systemie, zastosowano oba typy zasilania.

Wykorzystywane w systemie kolektory lokalizuje się na otwartym terenie, dlatego montowane są w specjalnych obudowach, charakteryzujących się wysokim stopniem miniaturyzacji oraz przystosowaniem do specyficznego środowiska pracy. Obudowy kolektorów zapewniają urządzeniom możliwość długotrwałej pracy przy bezpośrednim działaniu na nie czynników atmosferycznych. Obudowa mieści również akumulator. Ponieważ kolektory są fragmentem systemu sieciowego są one łączone z innymi kolektorami na bazie topologii typu punkt-punkt, punkt-wielopunkt oraz krata.

W oferowanym rozwiązaniu, do pomiaru zjawisk hydrologicznych zachodzących w monitorowanych ciekach wodnych, stosowane są dwa typy czujników poziomu oraz kierunku i prędkości przepływu wody. W zależności od potrzeb wykorzystuje się dwa typy czujników poziomu wody, różniące się sposobem pomiaru. Pierwszy z nich to czujniki ciśnieniowe lokalizowane na dnie cieku lub zbiornika wody. Zasada pomiaru wysokości słupa wody opiera się na porównaniu wartości ciśnienia mierzonego przez sondę w wodzie na dnie zbiornika z ciśnieniem atmosferycznym. Typowy zakres pomiarowy czujnika ciśnieniowego to 0-5 m, a dokładność 0,1 % zakresu pomiarowego. Drugi typ czujników, to czujniki radarowe montowane ponad lustrem wody na wysięgniku lub innej istniejącej budowlu. Zapewniają one wysoką dokładność przy bardzo szerokim zakresie pomiaru, sięgającym nawet kilkudziesięciu metrów. Ich działanie opiera się na pomiarze czasu powrotu wiązki radarowej odbitej od powierzchni wody.

W modelu zjawisk hydrologicznych wykorzystywanym w SMZS występuje również prędkość przepływu wody. Zastosowanie znajdują tutaj czujniki elektromechaniczne oraz ultradźwiękowe. Pierwsze z nich bazują na turbinach, których łopatki obracane są przez przepływającą wodę, w czujnikach ultradźwiękowych zastosowanie znajduje efekt Dopplera. Tego typu czujniki mierzą jednocześnie prędkość przepływu oraz poziom rzeki. Aby maksymalizować trafność prognoz SMSZ dodatkowo wyposażono w czujniki wilgotności gruntu i powietrza, kierunku i siły wiatru oraz miernik intensywności opadu. W najbardziej zaawansowanej wersji, wykorzystującej najdokładniejszy model hydrologiczny, dodatkowo stosuje się czujnik parametrów chmur. W wersji tej, oprócz prognoz podtopień i powodzi możliwe jest również prognozowanie innych zjawisk pogodowych (gradobicie, wichury, nawałnice).

Wszystkie typy czujników dołączane są bezpośrednio do kolektorów danych zapewniających im komunikację z CWZ. W zależności od typu, posiadają one własne

zasilanie (bateria lub akumulator z panelem fotowoltaicznym) lub zasilane są ze źródeł kolektora lub agregatora danych.

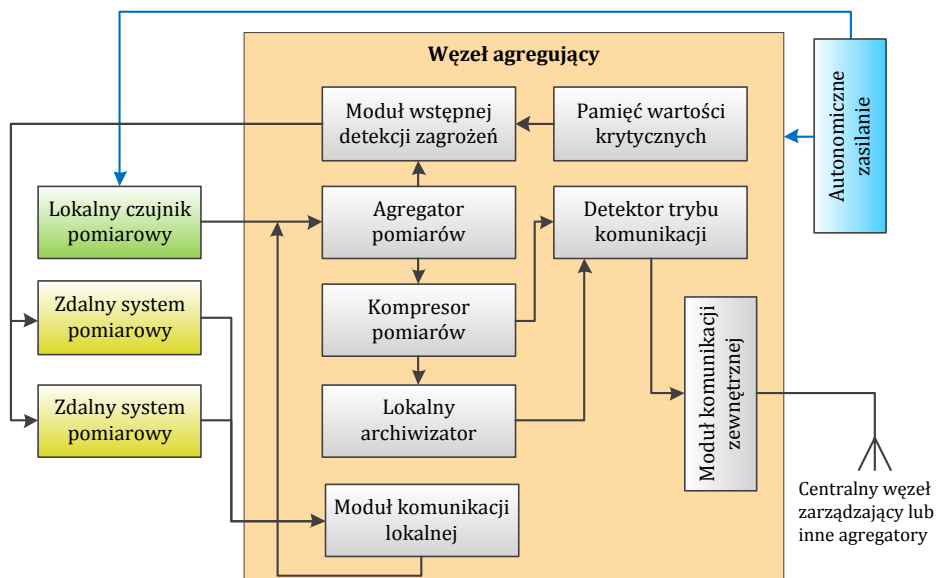
W standardowym trybie funkcjonowania, ZSP przez większość czasu znajduje się w trybie hibernacji minimalizującym zużycie energii. Chwilowe przejście do trybu aktywności może być wywołane wewnętrznym zegarem określającym upływ danego czasu lub żądaniem zewnętrznym pochodzącym z innego kolektora lub agregatora danych. Zwiększanie częstotliwości stanów aktywności jest uzasadnione tylko w przypadku możliwości wystąpienia zagrożeń. W celu ograniczenia kosztów inwestycji, kolektory danych montowane są na wysięgnikach w bezpośrednim sąsiedztwie monitorowanego obiektu. W rozważanym przypadku są to mosty nad monitorowanymi rzekami. Dobierając wysięgnik należy zapewnić optyczną widoczność kolektorów i agregatorów, z którymi dany kolektor się komunikuje.

#### **8.4. Węzeł agregujący**

Węzły agregujące, nazywane dalej agregatorami, to wysokospecjalizowane komputery służące do zbierania i wstępnego przetwarzania informacji przesyłanych przez kolektory danych. Dodatkowo przy pomocy tradycyjnych sieci teleinformatycznych transmitują one zebrane informacje do miejsc ich gromadzenia i przetwarzania. Agregatory mogą być również wyposażone we własne czujniki pomiarowe pełniąc wówczas rolę zarówno kolektora, jak i agregatora danych. Z uwagi na specyfikę funkcjonowania oraz szczególną rolę pełnioną w systemie, agregatory są zasilane ze źródeł zapewniających pełną autonomię działania.

W pierwszej kolejności, agregator gromadzi dane pochodzące ze zdalnych systemów pomiarowych. Do komunikacji z nimi wykorzystuje on protokoły opisane specyfikacją 802.15.4. Ma on również możliwość sterowania aktywnością ZSP. Informacje o stanie środowiska mogą być również dostarczane przez lokalne czujniki pomiarowe, które zasilane są z samego węzła agregującego. Komunikacja zewnętrzna agregatora wykonywana jest za pomocą technologii bezprzewodowych (Wi-Fi, LMDS, WiMAX, GPRS, VSAT) wykorzystujących stos protokołów TCP/IP. Dostępne są również przewodowe interfejsy Ethernet i DSL. Wybór konkretnej technologii dokonywany jest na podstawie jej dostępności. W pierwszej kolejności można rozpatrywać wykorzystanie sieci Wi-Fi pracujących w standardzie 802.11. Są one najtańsze w eksploatacji i zapewniają dobre parametry komunikacyjne [121], [79], [122]. Ponieważ proponowane agregatory wyposażone są w kilka alternatywnych interfejsów zewnętrznych wybór konkretnego z nich zostanie dokonany po instalacji agregatora.

Struktura funkcjonalna agregatora danych wykorzystywanego w SMZS przedstawiona została na rys. 47.



Rys. 47. Struktura funkcjonalna zdalnego systemu pomiarowego

Ponieważ agregator danych jest w pełni autonomicznym komputerem zarządzanym przez system operacyjny Linux, może on wykonywać szereg dodatkowych funkcji optymalizujących pracę SMZS, o których informujemy poniżej. Bieżący stan środowiska opisuje grupa parametrów takich jak: poziom lustra wody, prędkość i kierunek nurtu (w przypadku pojawienia się tzw. cofki), wilgotność powietrza i gruntu itp. Zadaniem agregatora pomiarów jest tworzenie paczek zawierających komplet wyników pomiarów ze wszystkich czujników i kolektorów w określonym momencie czasu. Dane pomiarowe grupowane i etykietowane są w trojaki sposób. Po pierwsze, każdy z pomiarów identyfikuje się typem czujnika. Po drugie, dane pochodzące z jednego kolektora grupuje się i oznacza etykietą identyfikującą konkretny kolektor. Po trzecie, dane uzyskane w czasie jednej sesji pomiarowej paczkuje się i opisuje czasem, oraz datą pomiaru.

W celu minimalizacji ilości przesyłanej informacji (co z uwagi na koszty jest szczególnie istotne dla łączności GPRS), paczki są kompresowane z wykorzystaniem dobranej specjalnie algorytmu. Ponadto, aby wyeliminować błędy transmisji, paczki opatrywane są funkcją skrótu zapewniającą dodatkową (oprócz samej technologii komunikacyjnej) weryfikację poprawności transmisji. Jeżeli z powodu różnych czynników, jakość komunikacji jest niezadowalająca, system można wypozażyć w transmisję z wykorzystaniem kodów poprawiających błędy.

W standardowym trybie funkcjonowania pomiary realizowane są w cyklu 15-to minutowym, a przesyłanie danych w trybie 4-ro godzinnym. Dlatego, skompresowane paczki pomiędzy sesjami łączności są chronione w lokalnym archiwizatorze. Jest on również wykorzystywany w przypadku utraty łączności pomiędzy WA a

CWZ. W przypadku transmisji zaglomerowanej, skompresowane i opatrzone skrótem paczki są łączone w superpakiet, który przed przesłaniem zostaje opatrzone skrótem. Zadaniem detektora trybu komunikacji jest wybór częstości wykonania operacji komunikacyjnych. W pozostałych trybach są one wykonywane: w trybie alarmowym – co 15 minut; w trybie katastrofy – co 5 minut. W ostatnim przypadku zmniejszany jest również czasookres dokonywania pomiarów.

W odróżnieniu od dostępnych na rynku rozwiązań, WA systemu monitorowania oprócz samego pomiaru zadanych wielkości fizycznych wykonuje wstępną interpretację pomiarów, wykrywając potencjalne zagrożenie. Dzięki temu, w przypadku niebezpieczeństwa WA sam zmienia tryb pomiaru i transmisji danych, początkowo na alarmowy, następnie na tryb katastrofy. Progi zmiany trybu pomiaru i komunikacji ustala się centralnie i są one przechowywane w pamięci wartości krytycznych. Zmiana wartości krytycznych może być także realizowana centralnie, niezależnie dla każdego węzła agregującego w trakcie funkcjonowania SMZS.

Ponieważ ZSP rozlokowane są w miejscach, w których niedostępne są tradycyjne źródła energii, zostały one wyposażone w autonomiczne wiatrowo-solarne zasilanie. Źródłami energii są: turbina wiatrowa o mocy 400 W oraz panele fotowoltaiczne o łącznej mocy 200 W. Do magazynowania energii używa się baterii akumulatorów żelowych o pojemności 200 Ah. Moduł zasilania zaopatrzony jest w hybrydowy kontroler ładowania zintegrowany z inwerterem pozwalający czasowo zasilac urządzenia wykorzystujące napięcie 230/240 V.

ZSP rozmieszczony jest na maszcie o wysokości 8 metrów. Konstrukcje masztów typu bez-odciągowego zostaną posadowione na fundamentach żelbetonowych o wymiarach 1,5 x 1,5 x 1,2 m. Maszty wykonano ze stopów aluminium i są one zaprojektowane do pracy w warunkach występujących w III strefie obciążenia wiatrem oraz II strefie oblodzenia. Instalacja odgromowa masztów składa się z iglicy umieszczonej na szczycie masztu, odciążu wykonanego z blachy FeZn20x3 oraz uziomu sztucznego. Zmierzona oporność uziomu nie będzie przekraczać wartości 10  $\Omega$ . Bateria akumulatorów wraz z kontrolerem ładowania zintegrowanym z inwerterami zostanie zamontowana w szafkach rozdzielczych umieszczonych na fundamentach wieży.

## 8.5. Centralny węzeł zarządzający

Dane zebrane i przesłane przez sieć sensorową będą przetwarzane w CWZ zlokalizowanym w miejscu wskazanym przez Inwestora. Podstawowymi komponentami CWZ są dwa serwery, z których jeden służy do prognozowania, drugi zaś stanowi platformę sprzętową dla relacyjnej bazy danych przeznaczonej do długoterminowego magazynowania danych. Serwery korzystają ze wspólnej macierzy dysków o pojemności 4 TB. Komunikacja pomiędzy infrastrukturą służącą do gromadzenia i przetwarzania danych, a sieciami zewnętrznymi, w tym siecią Internet, odbywa się za pośrednictwem zintegrowanej platformy komunikacyjnej realizującej funkcjonalność routera, zapory ogniowej oraz koncentratora VPN.

Całość sprzętu zostanie umieszczona w szafie teleinformatycznej wyposażonej w system chłodzenia. W celu zapewnienia bezprzerwowej pracy systemu poprzez uniezależnienie się od zaników napięcia zasilającego, w szafie zamontowane zostaną dwa zasilacze UPS o mocy 1000 VA każdy.

Parametry serwerów zostały dobrane tak, aby zapewnić zasoby systemowe oraz moc obliczeniową odpowiednią dla złożoności obliczeniowej prognozowania oraz magazynowania wskazanej ilości danych pomiarowych i prognoz. Dlatego, wykorzystano architekturę opartą o dwa procesory 4-rdzeniowe (ewentualnie jeden procesor 6-rdzeniowy) z rodziny Intel lub ich odpowiednik. Pamięć operacyjna serwerów to 64 GB. Zastosowana architektura serwerów pozwala na dalszą rozbudowę, co zapewnia zwiększenie wydajności platformy sprzętowej w miarę wzrostu wymagań ze strony oprogramowania (zastosowanie dodatkowych funkcji monitoringu).

Zasilacze UPS zapewniają autonomię pracy sprzętu przez czas nie krótszy niż 20 min. Zaleca się, aby lokalizacja CWZ została wybrana z uwzględnieniem wysokiej niezawodności sieci zasilającej.

System monitorowania zagrożeń środowiskowych można zaliczyć do systemów infrastruktury krytycznej. Zauważmy, że jego uszkodzenie może wywołać poważne zagrożenia, szczególnie dla osób zakładających niezawodność jego funkcjonowania. Dlatego, w trakcie projektowania SMZS szczególną uwagę zwrócono na problemy jego dostępności, żywotności i niezawodności. Szacuje się, że w docelowej konfiguracji dostępność systemu będzie nie niższa niż 99.99%, co stawia go na poziomie dostępności wykorzystywanym do zarządzania ruchem lotniczym.



## ROZDZIAŁ 9

### Przykład sensorowego systemu monitoringu środowiskowego

#### 9.1. Wprowadzenie

Brzóza Królewska jest największą wsią gminy Leżajsk, usytuowaną w jej zachodniej części, na obrzeżach Kotliny Sandomierskiej. Jak pokazuje kilkusetletnia historia wsi, od zarania dziejów, największe straty materialne powodowały powodzie wywołane przez lokalną rzekę – Tarlakę. Wzbieranie w niej wody skutkowało zniszczeniem gospodarstw rolnych oraz infrastruktury wiejskiej, znane są nawet przypadki, że rezultatem wysokiego poziomu wody były ofiary śmiertelne. Niestety, intensywność podtopień, a nawet powodzi, w ostatnich latach niebezpiecznie wzrosła. Wspomniane zjawiska posiadają charakter lokalny nie powodując zniszczeń poza obszarem wsi i zapewne dlatego, budzą one niewielkie zainteresowania władz województwa i całość działań w tym zakresie spoczywa na samorządzie gminnym.

Tarlaka jest najważniejszym elementem całego systemu hydrologicznego, który tworzą jej dopływy, rowy melioracyjne, sztuczne jezioro o powierzchni 8 hektarów, zbiornik przeciwpożarowy oraz staw rybny. W stanie normalnym, średnia prędkość nurtu rzeki nie przekracza 0,5 m/s, jej szerokość 3-4 m, a głębokość na całej długości 50 cm.

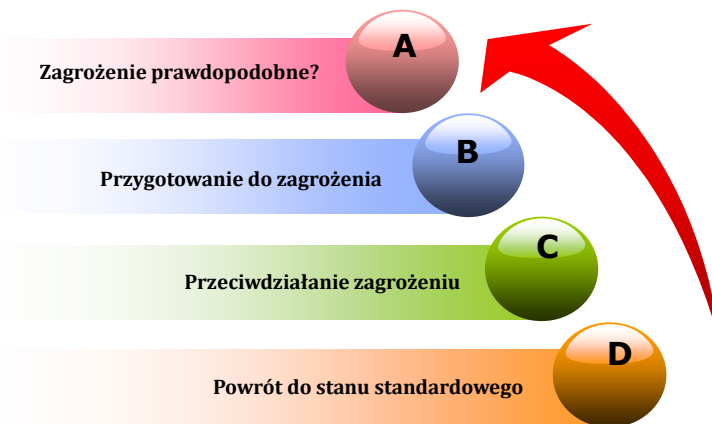
Niestety, żaden z elementów infrastruktury hydrotechnicznej nie zapewnia przeciwdziałania powodziom i podtopieniom, które rokrocznie występują na terenie wsi. Główną tego przyczyną jest katastrofalny stan powyższych elementów, za ostatnie kilkanaście lat praktycznie nie były wykonywane żadne zabiegi konserwacyjne. Szczególną rolę odgrywa tutaj stan sztucznego jeziora, w którym od dziesięciolecia nie funkcjonuje regulacja przegrody. W 2010 roku gwałtowny przybór wody w zbiorniku, będący rezultatem intensywnych opadów zagrażał nieobliczalnym w skutkach zniszczeniem zapory. Katastrofie zapobiegła wyłącznie przytomność mieszkańców, którzy własnymi siłami, narażając się na niebezpieczeństwo, obniżyli poziom przegrody. Sytuację hydrologiczną dodatkowo komplikują występujące w górnym biegu rzeki żeremia bobrów, powodujące powstawanie rozlewisk i spiętrzeń.

Zjawiska powodziowe na terenie wsi Brzóza Królewska są, przede wszystkim, rezultatem nawalnych deszczy oraz wiosennych roztopów. Rokrocznie pojawiające się w okresie od maja do sierpnia opady wysokości 20-30 l/m<sup>2</sup> nieuchronnie prowadzą do znacznego podniesienia poziomu wody w rzece i w konsekwencji do podtopienia sąsiadujących z nią gospodarstw i pól uprawnych. Dnia 3 czerwca 2010 wystąpiły opady na poziomie 140 l/m<sup>2</sup>, w rezultacie których zalanych było ponad 150 domostw, zostały uszkodzone drogi, mosty oraz kładki na rzece.

W ostatnim dziesięcioleciu opady takie pojawiły się już kilkakrotnie, każdorazowo powodując znaczne straty.

Rozwiązaniem powyższych problemów byłoby zastosowanie aktywnego systemu monitoringu środowiskowego, obejmującego system hydrologiczny rzeki Tarlaka. Oprócz permanentnego pomiaru stanu środowiska, system wykonywałby czynności regulacyjne na przegrodzie sztucznego jeziora, co zmniejszałaby zagrożenia wywołane nadmiarem wody [82], [123]. Reakcja systemu monitoringu na ewentualne zagrożenie składa się z czterech faz przedstawionych na rys. 48.

W fazie **A**, na podstawie permanentnych pomiarów zjawisk meteorologicznych i stanu systemu hydrologicznego, monitoring wykrywa pojawienie się zagrożenia i przechodzi do fazy **B** swojego funkcjonowania. W fazie tej, podejmowane są działania mające na celu zmniejszenie skutków zbliżającego się niebezpieczeństwa. Faza ta trwa do momentu wystąpienia samego zagrożenia, kiedy to system przechodzi do fazy **C** – przeciwdziałania. Trwa ona do chwili, kiedy zagrożenie ustąpi i system rozpoczyna funkcjonowanie w fazie **D** – powrotu. Po jej zakończeniu, system hydrologiczny, poprzez działania monitoringu powraca do stanu wyjściowego i cykl jego pracy powtarza się.



Rys. 48. Cztery fazy funkcjonowania systemu przeciwdziałania zagrożeniom

## 9.2. Charakterystyka badanego systemu hydrologicznego

Systemem hydrologicznym będziemy nazywać zbiór wszystkich obiektów wodnych rozlokowanych na pewnym terytorium, powiązanych i współdziałających ze sobą. System taki może zostać opisany za pomocą takich parametrów jak: długość głównej rzeki i jej dopływów, jej krętość, gęstość sieci rzecznej, współczynnik rozgałęzienia, jeziorność, bagnistość itp. Większość spośród charakterystyk można określić na podstawie mapy o akceptowalnej skali, wykorzystując do tego najprostsze przyrządy i odpowiednie wzory [119], [124], [78]. Poniżej określamy najważniejsze parametry systemu hydrologicznego rzeki Tarlaka, na początek *parametry morfometryczne*.



**Długość rzeki.** Długością rzeki nazywamy odległość dzielącą źródła rzeki od jej ujścia. Źródłem nazywać będziemy miejsce, w którym rozpoczyna się stały bieg wody, ujściem zaś miejsce, gdzie rzeka kończy się [119], [124]. Do określenia długości Tarlaka i jej dopływów wykorzystano mapę w skali 1:25 000, a ostateczną wartość  $L$  otrzymano za pomocą wzoru:

$$L = L_p \alpha,$$

gdzie:  $L_p$  – długość rzeki uzyskana na podstawie mapy;  $\alpha$  – współczynnik korekcyjny określany intuicyjnie na podstawie krętości rzeki. Długość Tarlaka oraz jej najważniejszych dopływów została przedstawiona w tabeli 7.

Tabela 7. Długość Tarlaka i jej dopływów.

L.p.	Nazwa rzeki	Współczynnik $\alpha$	Długość $L$ , km	Odległość od ujścia, km
1	Tarlaka	1,1	15,73	-
2	Dopływ 1	1,05	3,36	5,9
3	Dopływ 2	1,05	3,87	3,11

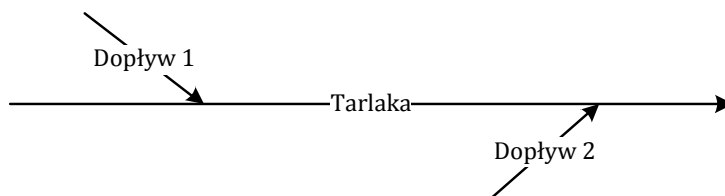
**Współczynnik krętości.** Parametr  $K_{kr}$  określa udział zakoli w biegu rzeki i może być wyliczony na podstawie wyrażenia:

$$K_{kr} = \frac{L}{L_p},$$

gdzie:  $L$  – długość rzeki na analizowanym odcinku, określona z uwzględnieniem wszystkich zakoli;  $L_p$  – długość odcinka łączące początek i koniec danego odcinka.

Dla Tarlaka współczynnik  $K_{kr}$  wynosi 1,49.

**Hydrologiczno-geograficzny schemat sieci rzecznej.** Jest to schematyczne przedstawienie rzeki i najważniejszych jej dopływów [124]. Został on pokazany na rys. 49, w sposób uwzględniający długości poszczególnych rzek. Zgodnie ze schematem, Tarlaka posiada dwa dopływy, o długości znacznie mniejszej od rzeki głównej. Dopływy te są całoroczne, tj. dostarczają one wodę do systemu hydrologicznego przez cały rok kalendarzowy.



Rys. 49. Schemat hydrologiczno-geograficzny sieci rzeki Tarlaka

**Podłużny spadek rzeki.** Określany jest jako stosunek różnicy pomiędzy wysokością n.p.m. źródeł i ujścia a długością rzeki [119], [124]. Wartość podłużnego spadku  $i$  rzeki opisuje wyrażenie:

$$i = \frac{H_z - H_u}{L},$$

gdzie:  $H_z, H_u$  – odpowiednio, wysokość źródeł i ujścia rzeki.

Często, wraz ze spadkiem, rzekę opisuje się jej podłużnym profilem, który jest graficznym przedstawieniem zmiany wysokości koryta od jej źródła do ujścia. Profil pozwala zorientować się na jakich odcinkach koryto rzeki jest bardziej strome, a na jakich bardziej płaskie. Ponieważ Tarlaka jest typowym przykładem niewielkiej rzeki nizinnej, której koryto ma na całej długości zbliżony spadek, nie ma potrzeby opisywać jej podłużnym profilem. Obecnie przejdziemy do omówienia *morfometrycznych charakterystyk* zlewni Tarlaki.

*Zlewnią rzeki*, nazywamy fragment powierzchni ziemi, włączając w to zawierającą wodę warstwę gleby, skąd wody w postaci spływu ściekają do konkretnej rzeki, systemu rzecznoego lub jeziora [119]. W hydrologii wyróżniamy dwa typy spływów: powierzchniowy oraz podziemny. W przypadku Tarlaki spotykamy wyłącznie spływ powierzchniowy. Linią na powierzchni ziemi, rozdzielającą spływ na dwa przeciwstawne kierunki nazywamy działem wodnym [124]. Ponieważ analizowana rzeka jest typowym przykładem rzeki równinnej, precyzyjne wyznaczenie działu wodnego jest stosunkowo trudne. Pomimo tego, autorzy określili dział powierzchniowy, który ze względów edytorskich nie będzie tutaj prezentowany. Na jego podstawie wyznaczono najważniejsze morfometryczne charakterystyki zlewni: powierzchnię, formę, wysokość oraz spadek.

**Powierzchnia zlewni Tarlaki.** Powierzchnia zlewni składa się z trzech elementów: **a.** zlewni głównej rzeki; **b.** zlewni dopływów; **c.** obszarów bezspływowych. W tabeli 8 pokazano komponenty tworzące zlewnię rzeki Tarlaka.

Tabela 8. Części składowe zlewni Tarlaki

L.p.	Nazwa spływu	Powierzchnia spływu w km <sup>2</sup>
1.	Tarlaka	20,45
2.	Dopływ 1	4,37
3.	Dopływ 2	6,31
4.	Obszary bezspływowe	14,12
<b>Suma = 45,34 km<sup>2</sup></b>		

**Długość i szerokość zlewni.** Długość  $L_z$  zlewni określa odległość pomiędzy ujściem rzeki a najdalszym jej punktem. Jeżeli rzeka nie ma zakoli, to jej zlewnia ma tzw. formę właściwą i jej długość określana jest długością prostej łączącej wspomniane dwa punkty. W praktyce, takie rozwiązanie wykorzystywane jest rzadko. Najczęściej, zlewnie posiadają łukowatą formę, a ich długość określana jest z wykorzystaniem mediany, która jest linią przechodzącą przez centra okręgów wpisanych w zlewnię i stycznych do obu przeciwnych jej stron [125]. Dla analizowanego przypadku  $L_z = 14,3$ .

Średnia szerokość  $B_{avg}$  zlewni, to iloraz jej powierzchni  $F_z$  i długości  $L_z$  :

$$B_{avg} = F_z / L_z .$$

Dla Tarlaki  $B_{avg} = 3,21$ . Z kolei największa szerokości  $B_{max}$  zlewni to maksymalna długość prostopadłej do linii długości zlewni. Dla naszego przypadku  $B_{max} = 7,57$ .

**Parametry kształtu zlewni.** Pierwszym z nich jest współczynnik  $\beta$  asymetrii charakteryzujący nierównomierność rozkładu powierzchni prawej i lewej części zlewni dla głównej rzeki. Współczynnik ten określa się wzorem:

$$\beta = (F_z^l - F_z^p) / \left( \frac{1}{2} (F_z^l + F_z^p) \right),$$

gdzie:  $F_z^l, F_z^p$  – odpowiednio, powierzchnie lewej i prawej części zlewni. Dla Tarlaki, wyliczona na podstawie wyrażenia wartość  $\beta$  wynosi -0,041.

Kolejnym parametrem kształtu jest współczynnik  $\delta$  rozciągłości, który jest ilorazem długości i średniej szerokości zlewni. Jest on określany na podstawie wzoru:

$$\delta = L_z^2 / F_z .$$

W naszym przypadku wartość współczynnika  $\delta$  wynosi 4,51.

### 9.3. Podstawowe czynniki określające wartość spływu

Decydujące znaczenie dla wartości spływu i jego czasowego rozkładu posiadają klimat oraz górna warstwa pokrycia powierzchni zlewni. Poniżej analizujemy czynniki, które w przypadku zlewni Tarlaki są najistotniejsze, na początek *charakterystyki powierzchni zlewni*.

**Pokrycie roślinne i struktura gleby.** Przeprowadzone badania pokazały, że na obszarze zlewni Tarlaki lasy mieszane zajmują 51% powierzchni, roślinność łąkowa 1,4%, pola uprawne i odłogi 12,23%. Pozostała część stanowi infrastruktura gospodarcza (zabudowania, drogi itp.).

Na obszarze zlewni, w szczególności na obszarze środkowego i dolnego biegu rzeki, dominują gleby bielicowe z przenikalnością wodną na poziomie 1,5-2,5 mm/min. W biegu górnym, wzdłuż koryta występują gleby mułowo-torfowe.

**Orografia i relief zlewni.** Dolina Tarlaki rozłożona jest południkowo, z południa na północ, takie też jest jej nachylenie. Możemy ją zaliczyć do grupy nizin falistych o deniwelacji nie przekraczającej 30 metrów. Powyższe uwarunkowania w jakimkolwiek stopniu nie wpływają na zjawiska klimatyczne zachodzące na analizowanym obszarze.

**Średnia wysokość zlewni.** Określenia średniej  $H_{avg}$  wysokości zlewni można dokonać na kilka sposobów, z których najczęściej wykorzystywane są dwa: **a.** bazujący na krzywej hipsograficznej; **b.** wykorzystujący wyrażenie:

$$H_{avg} = f_1 H_1 + f_2 H_2 + \dots f_n H_n / F, \quad (1)$$

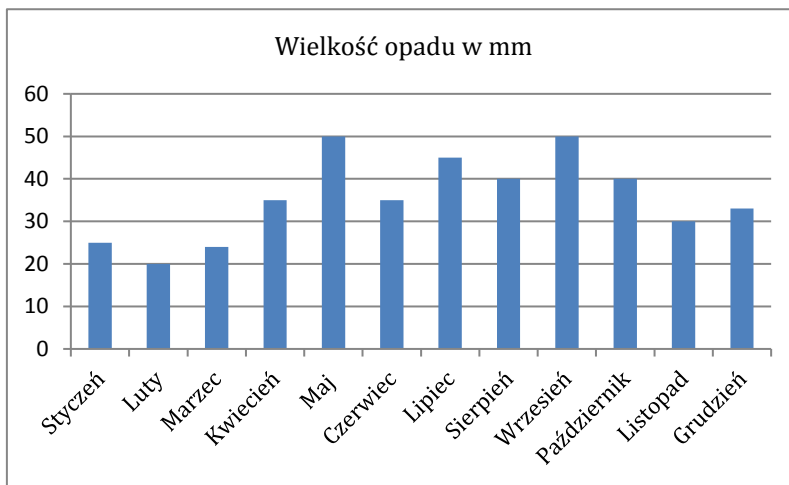
gdzie:  $f_1, f_2, \dots, f_n$  – powierzchnie zlewni w  $\text{km}^2$ , zawarte pomiędzy określonymi poziomiami;  $H_1, H_2, \dots, H_n$  – średnie wysokości w m pomiędzy poziomiami;  $F$  – powierzchnia zlewni w  $\text{km}^2$ . Wartość  $H_{avg}$  określona na podstawie wyrażenia (7) dla zlewni Tarlaki wynosi 202,7.

**Współczynniki geomorfologiczne zlewni.** Wyróżniamy: jeziorność  $\delta_j$ , bagnistość  $\delta_b$  i lesistość  $\delta_z$ . Przykładowo, jeziorność określa się wyrażeniem:

$$\delta_j = \sum f_j / F, \quad (2)$$

gdzie:  $f_j$  – powierzchnia zbiornika wodnego. Wartości powyższych współczynników są odpowiednio równe:  $\delta_j = 0,0017$ ,  $\delta_b = 0,015$ ,  $\delta_z = 0,51$ .

**Charakterystyki klimatyczne.** Najważniejszą charakterystyką klimatyczną, wpływająca na funkcjonowanie projektowanego systemu monitoringu są opady atmosferyczne. Średnie opady na obszarze zlewni Tarlaki w ujęciu miesięcznym za lata 2009-2010 pokazano na rys. 50. Maksymalny, zanotowany w tym okresie opad, wyniósł 210 mm.

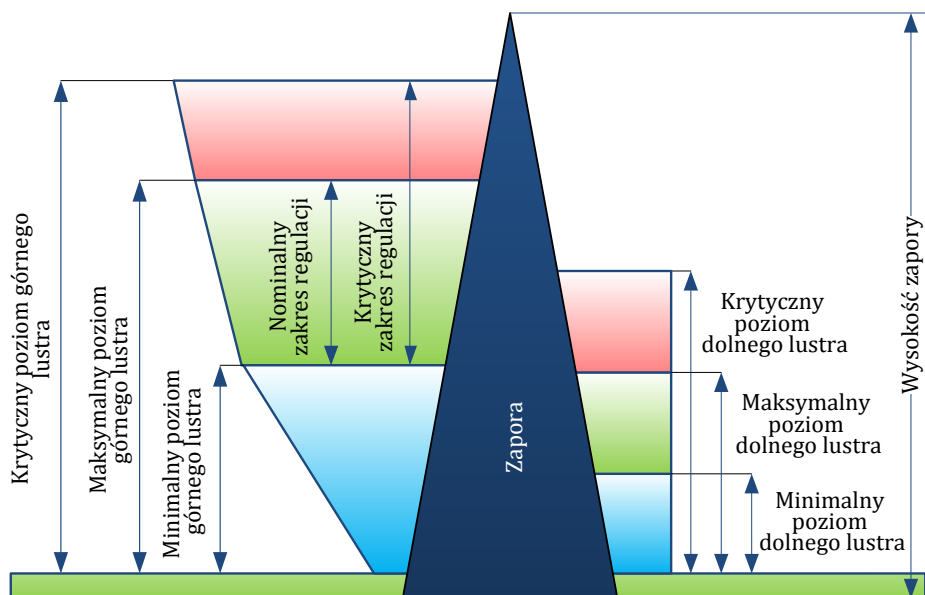


Rys. 50. Średnie miesięczne opady zlewni Tarlaki.

#### 9.4. Rola zbiornika w systemie hydrologicznym Tarlaki

Z punktu widzenia działań zapobiegawczych, najistotniejszym elementem systemu hydrologicznego Tarlaki jest zbudowany końcem lat 70-tych zbiornik wodny. Ma on powierzchnię 8 hektarów i maksymalną głębokość 4 metry. Niestety stan samej zapory nie pozwala na wykorzystanie go do przeciwdziałania zagrożeniom powodziowym – mechanizm regulujący wysokością przegrody jest uszkodzony i wykorzystywany jest wyłącznie górny spust wody.

Na rys. 51 przedstawiono charakterystyczne poziomy regulacji w sztucznym zbiorniku wodnym, którego niewątpliwym przykładem jest rozpatrywany obiekt.



Rys. 51. Poziomy regulacji sztucznego zbiornika wodnego.

W zbiorniku wyróżniamy dwa typy poziomów wody: górny i dolny. Pierwszy z nich opisuje charakterystyki przed przegrodą, drugi zaś poniżej jej. Wartości dla górnego lustra wody określane są na etapie projektowania zbiornika i wynikają z jego właściwości konstrukcyjnych oraz charakterystyk wodnego ekosystemu.

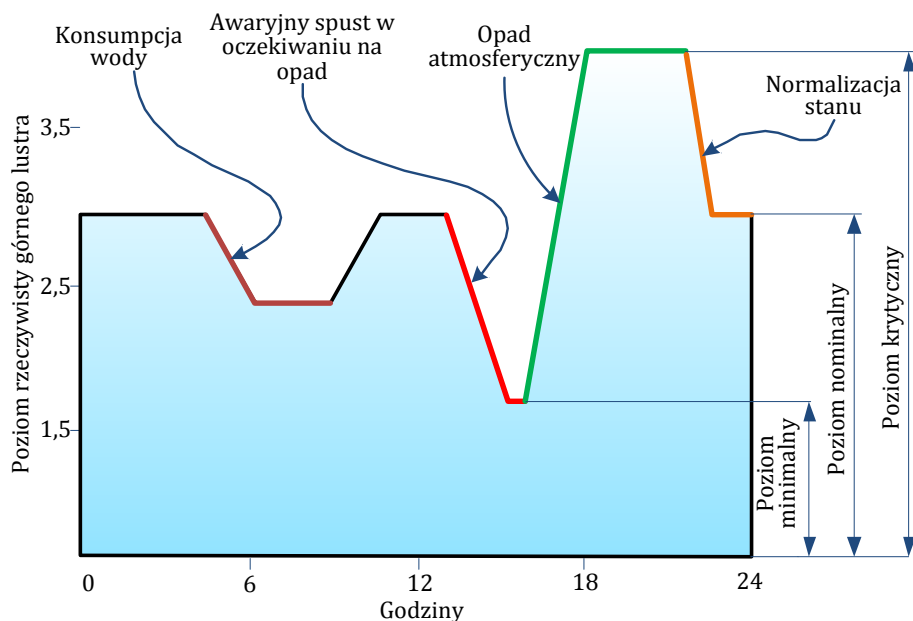
*Krytyczny poziom górnego lustra* jest ograniczony wytrzymałością samej zapory i nigdy nie powinien być przekraczany. Woda może posiadać ten poziom przez bardzo krótki czas, wyłącznie w sytuacjach szczególnego zagrożenia. Utrzymywanie go przez dłuższy okres grozi uszkodzeniem, a nawet zniszczeniem zapory. W omawianym systemie poziom ten po raz ostatni wystąpił w czerwcu 2010 i groził nieobliczalnym w skutkach przerwaniem zapory. *Maksymalny poziom górnego lustra* jest najwyższym poziomem, który można utrzymywać w zbiorniku przez dowolnie długi okres czasu. Jego wartość wynika, przede wszystkim, z możliwych ustawień elementu regulacyjnego i jest on ustalany na bazie analizy właściwości linii brzegowej zbiornika. Z kolei *poziom minimalny* jest ustalany najniższym ustawieniem elementu regulacyjnego i wynika z właściwości ekosystemu powyżej zapory. W zbiorniku można wyróżnić także *poziom nominalny*, który należy traktować jako zalecany w standardowych warunkach funkcjonowania systemu hydrologicznego. Jego wykorzystanie zapewnia najlepsze warunki funkcjonowania ekosystemu i ograniczenie erozji linii brzegowej. Z przedstawionymi wyżej wartościami nierozdzielnie wiążą się zakresy regulacji. W normalnym funkcjonowaniu należy ograniczać się do wykorzystania bezpiecznego, *nominalnego zakresu*, w sytuacjach szczególnych, krótkotrwale można wykorzystywać również *zakres krytyczny*.

Podobnie jak górne, również dolne lustro posiada kilka charakterystycznych poziomów wody. Użycie *poziomu krytycznego* jest działaniem wyjątkowym, które może mieć miejsce w sytuacji zagrożenia powodziowego i wiąże się z zalaniem różnego typu obiektów opóźniających odpływ. Poziom ten może być również wykorzystywany okresowo do oczyszczania koryta rzeki. Jeżeli stosowany jest *poziom maksymalny*, rzeka na całej swej długości znajduje się w korycie. Z kolei *poziom minimalny*, to najniższy poziom wody w rzece bezpieczny dla ekosystemu.

Zapora na rzece Tarlaka powinna spełniać rolę regulatora poziomu dolnego lustra, przy zachowaniu górnego na bezpiecznym poziomie. W ogólnym przypadku, zadaniem systemu sterowania będzie taka regulacja przegrodą zapory, aby nie przekroczyć maksymalnego poziomu dolnego lustra, nie obniżając górnego i dolnego lustra poniżej poziomu minimalnego. Aktywny system monitoringu pozwala nie tylko przeciwdziałać zagrożeniom powodziowym, ale może być wykorzystany także do utrzymywania poziomu wody w zbiorniku na wartości optymalnej dla konkretnych uwarunkowań pogodowych oraz potrzeb przemysłowych i rolnych. Na rys. 52 przedstawiono przykładowy cykl regulacji zaporą.

W standardowym trybie funkcjonowania poziom górnego lustra utrzymywany jest w okolicach stanu nominalnego. Poziom ten, w rezultacie konsumpcji wody, może ulec obniżeniu. Aby przeciwdziałać temu, sterowanie ogranicza ilość wody przepływającej do dolnego lustra, stabilizując poziom górnego na akceptowalnym znaczeniu. Po ustaniu poboru wody sterowanie doprowadza do ustalenia górnego lustra ponownie na poziomie nominalnym.

Jeżeli spodziewany jest intensywny opad, system przygotowuje zbiornik do przyjęcia nadmiarowej ilości wody. W tym celu wykonywany jest awaryjny spust do poziomu określonego na podstawie prognoz spływu, w skrajnym przypadku do poziomu minimalnego. Po jego pojawieniu się, poziom wody w zbiorniku rośnie, przy czym sterowanie stara się utrzymać go na poziomie nominalnym. Jeżeli prognozy pokazują, że objętość spływu nie pomieści się w zbiorniku, dolne lustro może być ustalane na poziomie maksymalnym lub okresowo na krytycznym. Po zakończeniu spływu do zbiornika nadmiarowej wody prowadzona jest normalizacja poziomu górnego lustra, tj. ponowne dojście do wartości nominalnej.

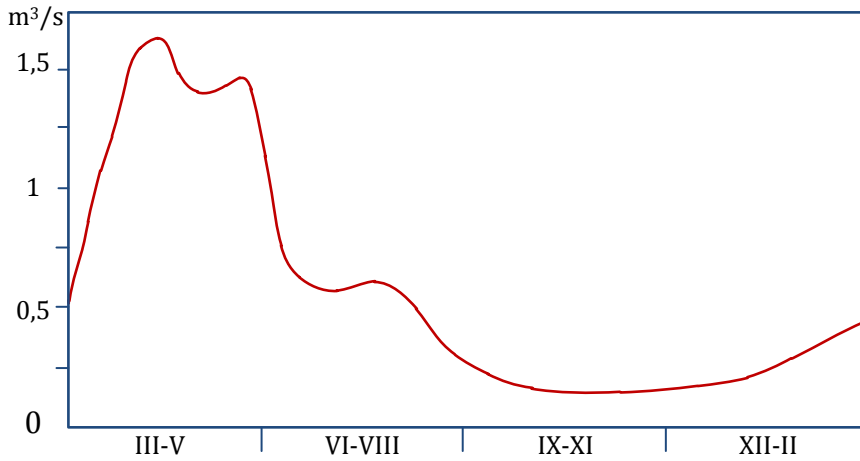


Rys. 52. Cykl regulacji zaporą dla różnych stanów systemu hydrologicznego

## 9.5. Analiza odpływu i stanów Tarlaki

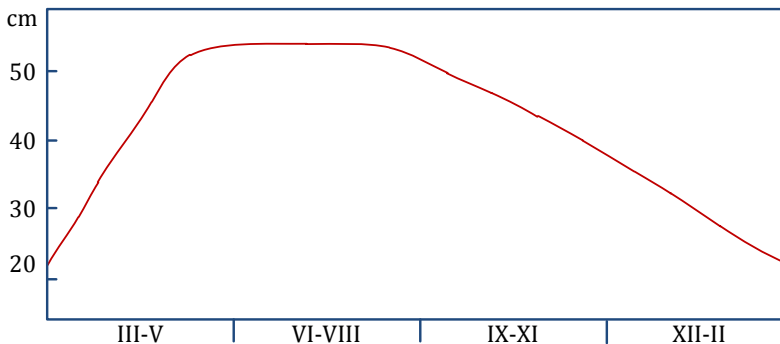
Przepływ rzeczny jest zjawiskiem trudno poddającym się opisowi analitycznemu. Ponieważ jego znajomość jest niezbędna do stworzenia adekwatnego modelu systemu hydrologicznego, konieczny jest empiryczny pomiar wartości kilku parametrów. W szczególności, niezbędne jest określenie: natężenia  $Q$  przepływu oraz stanu wody  $H$  w rzece. Powyższych pomiarów i wyliczeń dokonano na podstawie metodyk przedstawionych w literaturze [125].

Natężenie przepływu  $Q$  nazywane w uproszczeniu przepływem, to podstawowa miara odpływu określana jako objętość wody płynącej przez określony przekrój poprzeczny koryta cieku w jednostce czasu, wyrażona w  $\text{m}^3/\text{s}$  [119]. Wartości średniotygodniowych przepływów w skali roku u ujścia Tarlaki pokazano na rys. 53. Przepływ maksymalny, który wystąpił podczas powodzi z 3 czerwca 2010 oszacowano na  $34 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Rys. 53. Średniotygodniowe przepływy Tarlaki za 2010 rok

Stan wody  $H$  w rzece, to wzniesienie zwierciadła wody w danym profilu rzeki ponad umownie przyjęty poziom odniesienia [119], [124]. Jako punkt odniesienia przyjęto poziom 10 cm poniżej poziomu dna koryta w momencie instalacji prowizorycznego wodowskazu. Pomiaru, dokonano dla punktu o współrzędnych 50 15'32.10"N i 22 18'16.09"E. Wyniki przedstawiono na rys. 54.

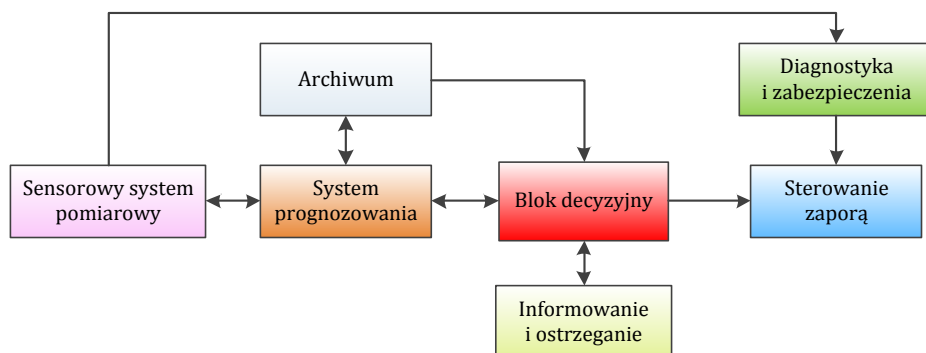


Rys. 54. Średniotygodniowy stan wody w Tarlaci za 2010 rok

## 9.6. Architektura systemu aktywnego monitoringu Tarlaki

Przeciwdziałanie zagrożeniom powodziowym powodowanym przez Tarlakę sprowadza się do zastosowaniu automatycznego sterowania poziomem górnego i dolnego lustra wody, które wykonywane będzie na podstawie prognoz opracowywanych w oparciu o dane historyczne oraz aktualne, dostarczane przez sieć sensorową z zespołu czujników. Pomiarowi podlegać będą wilgotność gleby, ściółki i powietrza, stan wody, szybkości nurtu oraz wartość opadu. Architektura systemu została przedstawiona na rys. 55.



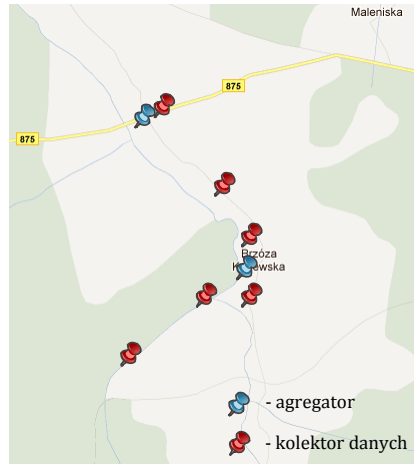


Rys. 55. Architektura systemu aktywnego monitoringu Tarlaki

Sensorowy system pomiarowy jest środowiskiem łączności bezprzewodowej opartym na dwóch typach elementów: agregatorach i koncentratorach danych. Do każdego z nich dołączone są czujniki pomiarowe, asortyment których zależy od lokalizacji węzła. Informacje z sensorów przekazywane są jednocześnie do *systemu prognozowania* oraz *diagnostyki i zabezpieczeń*. Prognozowanie oparte jest na specjalnie opracowanych dla Tarlaki modelach hydrologicznych, analizie statystycznej zachowania rzeki oraz sztucznej inteligencji. Rodzaj podejmowanego działania określany jest w *bloku decyzyjnym*. Do tego celu wykorzystuje on nie tylko opracowane prognozy, ale również dane historyczne zmagazynowane w *archiwum*, w którym poszukuje on analogii w zachowaniu systemu hydrologicznego. Blok decyzyjny podejmuje dwie podstawowe decyzje: **a.** o wszczęciu bądź zaniechaniu procedury kryzysowej; **b.** o wysokości ustawienia regulowanej przegrody. W zależności o rodzaju prognozowanego zagrożenia *system informowania i ostrzegania* rozsyła informacje do określonej wcześniej grupy klientów.

*Sterowanie zaporą* jest dublowane. Jeżeli z jakiegoś powodu system podstawowy oparty o blok decyzyjny nie zadziała i poziom górnego lustra przyjmie niedopuszczalną wartość, sterowanie przejmuje blok diagnostyki i zabezpieczeń utrzymujący poziom obu luster w dopuszczalnym zakresie. Blok ten wyposażony jest we własny system czujników określających poziomy obu luster.

Lokalizacja agregatorów i kolektorów danych pokazana została na rys. 56.



Rys. 56. Lokalizacja geograficzna agregatorów i kolektorów danych systemu

## 9.7. Podstawowe funkcje systemu monitorowania

**Trendy hydrologiczne.** Podstawowym zadaniem systemu aktywnego monitoringu Tarlaki jest ograniczenie wpływu niekorzystnych zjawisk hydrologicznych i dzięki temu poprawa jakości życia mieszkańców zlewni rzeki. Konkretnie działania podejmowane są na podstawie prognoz opracowywanych z wykorzystaniem pomiarów aktualnego stanu środowiska oraz tzw. trendu hydrologicznego, który uwzględnia wilgotność otoczenia i jej ewentualne zmiany. Trend jest określany na podstawie wskazań czujników, modelu zmian wilgotności oraz danych archiwalnych gromadzonych przez system. Przez cały czas funkcjonowania, oparty na metodach ewolucyjnych system ekspertowy określa współczynnik wiarygodności trendu, który wraz z upływem czasu poprawiał się. Wyróżniamy trzy wartości trendu: **a. ujemny**, kiedy panuje susza atmosferyczna lub glebowa, tj. środowisku obserwujemy deficyt wody; **b. neutralny**, opisujący środowisko zrównoważone hydrologicznie; **c. dodatni**, w którym obserwujemy nadmiar wody.

**Przeciwdziałanie zjawisku niedoboru wody.** Jeżeli w środowisku występuje neutralny trend hydrologiczny górne i dolne lustro utrzymywane są na poziomie nominalnym. Jeżeli trend zmienia się na ujemny prawdopodobna jest susza i system przechodzi do trybu magazynowania wody na potrzeby gospodarcze. W tym celu, spływ wody ze zbiornika utrzymywany jest na poziomie zapewniającym minimalny poziom dolnego lustra, a nadmiary wody są magazynowane w zbiorniku.

**Przeciwdziałanie zjawiskom powodziowym.** Jeżeli trend hydrologiczny jest dodatni i spodziewane są intensywne opady, prawdopodobnym staje się wystąpienie powodzi. W takim przypadku, poziom górnego lustra doprowadzany jest do wartości minimalnej poprzez utrzymywanie maksymalnego poziomu dolnego lustra. Utworzony w ten sposób zapas pojemności pozwala przyjąć spodziewany

---

nadmiar wody. Proces regulacji wykonywany jest w czasie rzeczywistym i wykorzystuje opracowane prognozy, a także wprowadzane przez operatora prognozy IMiGW.

**Sytuacje krytyczne.** W opisanych powyżej trybach przeciwdziałania woda utrzymywana jest na bezpiecznym poziomie, tj. nie są przekraczane maksymalne dopuszczalne wysokości luster. W szczególnych przypadkach, system przewiduje ich chwilowe podniesienie do wartości krytycznej. Działanie takie ma na celu ochronę obszarów poniżej zbiornika lub jego samego i nie może mieć charakteru długotrwałego, gdyż może powodować poważne zmiany w ekosystemie, bądź uszkodzenie zbiornika.



## Bibliografia

- [1] J. Such i M. Szcześniak, *Filozofia nauki*, Poznań: Wydawnictwo: Naukowe UAM, 2007.
- [2] G. B. Wiersma, Ed., *Environmental monitoring*, Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [3] P. Patnaik, *Handbook of environmental analysis : chemical pollutants in air, water, soil, and solid wastes*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [4] L. Davis, *Natural Disasters*, II ed., New York: Facts On File, 2009.
- [5] A. M. Gunn, *Encyclopedia of Disasters: Environmental catastrophes and human tragedies*, Westport: GREENWOOD PRESS, 2008.
- [6] M. Żuber, Red., *Katastrofy naturalne i cywilizacyjne*, Wrocław: Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Łądowych, 2006.
- [7] В. И. Арнольд, *Теория катастроф*, III red., Москва: Наука, 1990.
- [8] A. Woodcock and M. Davis, *Catastrophe theory*, Toronto: Clarke, Irwin & Company Limited, 1978.
- [9] I. V. Nemchinov, *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*, V. V. Adushkin, Red., Dordrecht: Springer, 2008.
- [10] D. Morris and E. McGann, *Catastrophe*, Pymble: HarperCollins Publishers, 2009.
- [11] J. F. Lancaster, *Engineering Catastrophes Causes and Effects of Major Accidents*, III ed., Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [12] Всемирный банк и Организация Объединенных Наций, *Стихийные бедствия и техногенные катастрофы. Превентивные меры*, Washington: The United Nations, The World Bank, 2012.
- [13] Е. М. Бабосов, *Катастрофы социологический анализ*, Минск: Наука и Техника, 1995.
- [14] Z. W. Kundzewicz i P. Matczak, „Zagrozenia naturalnymi zdarzeniami ekstremalnymi,” *Nauka*, pp. 77-86, 2010.
- [15] J. Ingleton, Red., *Natural Disaster Management*, Leicester: Tudor Rose, 1999.
- [16] Л. И. Маневич, „О теории катастроф,” *Соровский Образовательный Журнал*, pp. 85-90, 2000.
- [17] P. W. Michor, *Elementary catastrophe theory*, Timisoara: Universitatea Din Timisoara, 1985.
- [18] Т. Постон и И. Стюарт, *Теория катастроф и ее приложения*, Москва: Мир, 1980.
- [19] A. Woodcock and T. Poston, *A Geometrical Study of the Elementary Catastrophes*, Berlin: Springer-Verlag, 1973.
- [20] A. Jarominiak i A. Rosset, *Katastrofy i awarie mostów*, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1986.

- 
- [21] M. Cheffena, „Industrial wireless sensor networks channel modeling and performance evaluation,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, nr 1, pp. 1-8, 2012.
- [22] L. N. Medford-Davis i B. G. Kapur, „Preparing for effective communications during disasters lessons from a World Health Organization quality improvement project,” *International Journal of Emergency Medicine*, nr 7:15, pp. 1-7, 2014.
- [23] P. Grossi and H. Kunreuther, *Catastrophe Modeling: A New Approach to Managing Risk*, New York: Springer, 2005.
- [24] G. Woo, *The mathematics of natural catastroph*, Danvers: Imperial College Press, 1999.
- [25] C. Photopoulos, *Managing Catastrophic Loss of Sensitive Data. A Guide for IT and Security Professionals*, Burlington: Syngress, 2008.
- [26] D. Johnston, „The role of multidisciplinary research and collaboration for improving the resilience of communities to volcanic risk,” *Journal of Applied Volcanology*, nr 1, p. 1, 2012.
- [27] C. S. Wasson, *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [28] R. B. Northrop, *Introduction to Complexity and Complex Systems*, New York: CRC Press, 2010.
- [29] C. Brown, *Chaos and Catastrophe Theories*, Thousand Oaks: Sage Publications, Inc., 1995.
- [30] V. I. Arnold, *Catastrophe Theory*, II ed., Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [31] Y. C. Lu, *Singularity Theory and an Introduction to Catastrophe Theory*, New York: Springer-Verlag, 1976.
- [32] В. И. Арнольд, Ньютон и Гук - первые шаги математического анализа и теории катастроф, от эвольвент до квазикристаллов, Москва: Наука, 1989.
- [33] Ю. К. Алексеев i А. П. Сухоруков, Введение в теорию катастроф, Москва: Издательство МГУ, 2000.
- [34] Р. Гилмор, *Прикладная теория катастроф*, т. I, Москва: Мир, 1984.
- [35] Р. Гилмор, *Прикладная теория катастроф*, том I, Москва: Мир, 1984.
- [36] R. D. Sagarin i T. Taylor, „Natural security how biological systems use information to adapt in an unpredictable world,” *Security Informatics*, nr 1:14, pp. 1-9, 2012.
- [37] A. e. al., „A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record,” *Journal of Applied Volcanology*, nr 2, pp. 1-24, 2013.
- [38] E. V. Leary, Red., *Earthquakes Risk, Monitoring and Research*, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009.
- [39] C. S. Desai i M. Zaman, *Advanced Geotechnical Engineering. Soil - Structure Interaction Using Computer and Material Models*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [40] M. Randolph i S. Gourvenec, *Offshore Geotechnical Engineering*, Abingdon: Spon Press, 2011.
- [41] N. Ghafoori, Ed., *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, Leiden: CRC Press, 2010.

- 
- [42] M. Hori, Introduction to Computational Earthquake Engineering, London: Imperial College Press, 2006.
- [43] R. W. Day, Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, II ed., New York: McGraw Hill, 2012.
- [44] J.-L. Briaud, Introduction to geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [45] K. A. Kobbacy i P. D. Murthy, Redaktorzy, Complex System Maintenance Handbook, London: Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [46] B. Bollobas, Modern Graph Theory, New York: Springer, 1998.
- [47] K. A. Ross i C. R. Wright, Matematyka dyskretna, Warszawa: PWN, 2011.
- [48] R. Diestel, Graph Theory, 4 red., New York: Springer, 2010.
- [49] R. J. Wilson, Wprowadzenie do teorii grafów, Warszawa: PWN, 2008.
- [50] S. Dasgupta, C. Papadimitriou i U. Vazirani, Algorytmy, Warszawa: PWN, 2010.
- [51] T. H. Cormen, C. E. Leiserson i R. Rivest, Wprowadzenie do algorytmów, Warszawa: WNT, 2004.
- [52] D. B. West, Introduction to Graph Theory, 2 red., New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [53] J. Bang-Jensen i G. Z. Gutin, Digraphs: Theory, Algorithms and Applications, London: Springer, 2010.
- [54] Z. Bubnicki, Teoria i algorytmy sterowania, Warszawa: PWN, 2005.
- [55] R. Bird, Pearls of Functional Algorithm Design, Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [56] E. Krok i Z. Stempnakowski, Podstawy algorytmów. Schematy blokowe, Warszawa: PWN, 2008.
- [57] M. D. Vose, The Simple Genetic Algorithm: Foundations and Theory, Boston: The MIT Press, 1999.
- [58] A. V. Goldberg i T. Radzik, „A heuristic improvement of the Bellman-Ford algorithm,” *Applied Mathematics Letters*, tom 6, nr 3, pp. 3-6, 1993.
- [59] D. Blostein i Y.-B. Kwon, Graphics Recognition. Algorithms and Applications: 4th International Workshop, New York: Springer, 2002.
- [60] C. A. Oliveira i P. M. Pardalos, Mathematical Aspects of Network Routing Optimization, New York: Springer, 2011.
- [61] J. Wang, Z. Ding i C. Jiang, „An Ontology-based Public Transport Query System,” w *First International Conference on Semantics, Knowledge and Grid*, 2005.
- [62] M. Gheorghe, T. Hinze, G. Pun, G. Rozenberg i A. Salomaa, Membrane Computing: 11th International Conference, New York: Springer, 2011.
- [63] M. van Steen, Graph Theory and Complex Networks: An Introduction, Maarten van Steen, 2010.
- [64] D. S. Johnson, „Approximation algorithms for combinatorial problems,” *Journal of Computer and System Sciences*, tom 9, nr 3, pp. 256-278, 1974.

- 
- [65] C. J. Ong i E. G. Gilbert, „The Gilbert-Johnson-Keerthi distance algorithm: a fast version for incremental motions,” w *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.
- [66] J. Chen, D. K. Friesen i H. Zheng, „Tight bound on Johnson's algorithm for Max-SAT,” w *Computational Complexity*, 1997.
- [67] G. Chartrand i P. Zhang, *A First Course in Graph Theory*, Boston: Dover Publications, 2012.
- [68] I. N. Bronsztejn, K. A. Siemiendiajew, G. Musiol i H. Muhlig, *Nowoczesne kompendium matematyki*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN, 2004.
- [69] J. Harris, J. L. Hirst i M. Mossinghoff, *Combinatorics and Graph Theory*, 2 red., New York: Springer, 2008.
- [70] J. L. Gross i J. Yellen, *Handbook of graph theory*, London: CRC Press, 2004.
- [71] M. van Steen, *Graph Theory and Complex Networks: An Introduction*, Burlington: Morgan Kaufman, 2010.
- [72] M. Hajder, P. Dymora i M. Mazurek, „Projektowanie topologii transparentnych sieci optycznych,” w *Konferencja Polski Internet Optyczny: technologie, usługi i aplikacje*, Poznań, 2002.
- [73] M. Mazurek, *Metody poprawy jakości komunikacji w systemach rozproszonych i wysokoprzepustowych sieciach komputerowych.*, Częstochowa: Politechnika Częstochowska, 2009.
- [74] A. Turowicz, *Teoria macierzy*, Kraków: Wydawnictwo AGH, 2005.
- [75] T. Kaczorek, *Wektory i Macierze w Automatyce i Elektrotechnice*, WNT: Warszawa, 2008.
- [76] T. A. Hamdy, *Operations Research: An Introduction*, New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [77] S. Bac i M. Rojek, *Meteorologia i klimatologia*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Naukowe, 1981.
- [78] K. Kozuchowski, Red., *Meteorologia i klimatologia*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN, 2006.
- [79] K. Makki, Red., *Sensor and Ad Hoc Networks. Theoretical and Algorithmic Aspects*, New York: Springer, 2008.
- [80] J. Zheng, Red., *Wireless Sensor Networkka*, Hoboken: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
- [81] M. Hajder, H. Loutskaa i W. Stręciwilk, *Informatyka. Wirtualna podróż w świat systemów i sieci komputerowych.*, I red., M. Hajder, Red., Rzeszów: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Informatyki i Zarządzania, 2002.
- [82] R. Grocki, M. Mokwa i L. Radczuk, *Organizacja i wdrażanie lokalnych systemów ostrzeżeń powodziowych*, Wrocław: Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, 2001.
- [83] S. V. Shidlovskiy, *Automated control. Reconfigurable structures.*, I red., Tomsk: Tomsk State University, 2006, p. 288.



- 
- [84] M. F. Acevedo, Real-Time Environmental Monitoring. Sensor and systems, I ed., Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [85] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications, 4th ed., New York: Springer Science, 2013.
- [86] P. Ripka and A. Tıpek, Eds., Modern Sensors Handbook, Chippenham: Antony Rowe Ltd, 2007.
- [87] A. Hać, Wireless sensor network designs, 2nd ed., Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [88] B. Wang, Coverage Control in Sensor Networks, London: Springer-Verlag, 2010.
- [89] G. Mao and B. Fidan, Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks, Hershey: Information Science Publishing, 2009.
- [90] P. Santi, Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [91] R. V. Slyke, 10 2001. [Online]. Available: <ftp://ftp.shore.net/members/ws/Support/BDC/nd.pdf>.
- [92] M. D. Mesarovic, D. Macko and Y. Takahara, Theory of hierarchical, multilevel systems, New York: Academic Press, 1970.
- [93] N. J. Smith and A. P. Sage, An introduction to hierarchical systems theory, Dallas: Information and Control Sciences Center, SMU Institute of Technology, 2005.
- [94] T. L. Saaty, Fundamentals of Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, Pittsburgh: RWS Publications, 2000.
- [95] C. S. Wasson, System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [96] A. Levitin, Introduction to the Design and Analysis of Algorithms, Phenix: Addison Wesley, 2006.
- [97] J. D. McCabe, Network Analysis, Architecture and Design, 3 ed., New York: Morgan Kaufmann, 2007.
- [98] J. Mendez-Rangel and C. Lozano-Garzon, "A network design methodology proposal for E-health in rural areas of developing countries," in *6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, Valencia, 2012.
- [99] D. L. Spohn, Data Network Design, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [100] R. L. Freeman, Fundamentals of Telecommunications, II ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [101] M. Illyas and I. Mahgoub, Eds., Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [102] D. Raychaudhuri and M. Gerla, Emerging Wireless Technologies and the Future Mobile Internet, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [103] A. S. Tannenbaum, Strukturalna organizacja systemów komputerowych, V red., Gliwice: Helion, 2006, p. 863.
- [104] J. L. Hennessy and D. A. Patterson, Computer Architecture a Quantitative Approach, I ed., San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002, p. 1143.

- [105] E. Perahia and R. Stacey, *Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [106] E. May, *Wireless Communications & Networks*, 2 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [107] M. Hajder, P. Dymora i M. Mazurek, „Projektowanie topologii transparentnych sieci optycznych,” w *Konferencja Polski Internet Optyczny: technologie, usługi i aplikacje*, Poznań, 2002.
- [108] T. L. Saaty, *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Proces*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [109] B. Mirkin, A. Rzhetsky and F. S. Roberts, *Mathematical Hierarchies and Biology*, New York: Amer Mathematical Society, 1997.
- [110] S. Dandamudi, *Hierarchical Scheduling in Parallel and Cluster Systems*, New York: Springer, 2003.
- [111] I. N. Bronsztejn, K. A. Siemiendiajew, G. Musiol i H. Muhlig, *Nowoczesne kompendium matematyki*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN, 2004.
- [112] A. Schrijver, *Theory of Linear and Integer Programming*, Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- [113] T. A. Hamdy, *Operations Research: An Introduction*, New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [114] S. M. Sinha, *Mathematical Programming: Theory and Methods*, Delhi: Elsevier Science, 2006.
- [115] J. L. Gross i J. Yellen, *Handbook of graph theory*, London: CRC Press, 2004.
- [116] A. Jain, N. Murty and P. J. Flynn, "Data Clustering: A Review," *ACM Computing Surveys*, vol. 31, no. 3, pp. 264-323, 3 1999.
- [117] N. Jardine, *Mathematical Taxonomy*, London: John Wiley & Sons, 1971.
- [118] M. S. Levin, "Towards hierarchical clustering," in *Computer Science - Theory and Applications: Second International Symposium on Computer Science in Russia*, Moscow, 2007.
- [119] E. Bajkiewicz-Grabowska i Z. Mikulski, *Hydrologia ogólna, IV red.*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN, 2007.
- [120] P. zbiorowa, *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*, Warszawa: Komitet Inżynierii Środowiska PAN, 2010.
- [121] J. Zheng, Red., *Wireless Sensor Network*, Hoboken: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
- [122] K. Holger i A. Willing, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [123] W. Chmielowski, *Zastosowania optymalizacji w gospodarce wodnej. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*, Kraków: Politechnika Krakowska, 2005.
- [124] P. zbiorowa, *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*, Warszawa: Komitet Inżynierii Środowiska PAN, 2010.
- [125] E. Bajkiewicz-Grabowska, A. Magnuszewski i Z. Mikulski, *Przewodnik do ćwiczeń z hydrologii ogólnej, 2 red.*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN, 1993.

- 
- [126] M. Hajder i P. Dymora , „Algorithmical and topological methods of fault tolerance assurance,” *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska – Informatica*, tom 2, pp. 143-151, 2004.
- [127] M. Hajder i P. Dymora , „A novel approach to fault tolerant multichannel networks designing problems,” *ANNALES UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA, SECTIO AI: INFORMATICA* , nr 1, pp. 66-77, 2011.
- [128] K. Nowicki i J. Woźniak, *Protokoły komunikacyjne sieci LAN, MAN i WAN*, I red., Kraków: Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, 1998.
- [129] M. Hajder, M. Mazurek i P. Dymora , „Topologie wirtualne wielowęzłowych sieci rozległych,” w *Polski Internet Optyczny: technologie, usługi i aplikacje. Materiały konferencji*, Poznań, 2002.
- [130] M. Hajder, H. Loutsikii i W. Stręciwilk, *Informatyka. Wirtualna podróż w świat systemów*, M. Hajder, Red., Rzeszów: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Informatyki i Zarządzania z siedzibą w Rzeszowie, 2002.
- [131] J. D. McCabe, *Network Analysis, Architecture and Design*, 3 ed., New York: Morgan Kaufmann, 2007.
- [132] W. Stalling, *Organizacja i architektura systemu komputerowego. Projektowanie systemu a jego wydajność*, I red., Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000, p. 769.
- [133] J. Vaideeswaran, *Computer Architecture and System Design*, New Delhi: NEW AGE INTERNATIONAL, 2008.
- [134] F. Halsall, *Data Communications, Computer networks and Open Systems*, Fourth Edition ed., New York: Addison-Wesley, 1996.
- [135] A. S. Tanenbaum i A. S. Woodhull, *Operating Systems Design and Implementation*, 3 red., New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [136] W. Stallings, *Systemy operacyjne. Struktura i zasady budowy*, I red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006, p. 900.
- [137] A. Silberschatz, P. B. Galvin i G. Gagne, *Podstawy systemów operacyjnych*, 7 red., Warszawa: WNT, 2006.
- [138] A. Silberschatz i P. B. Galvin, *Podstawy systemów operacyjnych*, III red., Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [139] G. Tomsho, *Guide to Networking Essentials*, Sixth red., Boston: Course Technology, 2011.
- [140] K.-F. Ssu, C.-H. Chou, H. C. Jiau i W.-T. Hu, „Detection and diagnosis of data inconsistency failures in wireless sensor networks,” *Computer Networks*, nr 50, pp. 1247-1260, 2006.
- [141] A. K. Somani, *Survivability and traffic grooming in WDM optical networks*, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [142] M. G. Solomon, *Fundamentals Of Communications And Networking*, 1 red., Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2011.
- [143] C. Smith i C. Gervelis, *Wireless Network Performance Handbook*, New York: McGraw-Hill Professional, 2009.

- 
- [144] J. M. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, New York: Springer, 2010.
- [145] D. Shuai i X. Feng, „The parallel optimization of network bandwidth allocation based on generalized particle model,” *Computer Networks*, nr 50, pp. 1219-1246, 2006.
- [146] M. L. Shooman, *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [147] L. Shizhuang, L. Lingyu i F. Yanyun, „ZigBee based wireless sensor networks and its applications in industrial,” w *Automation and Logistics*, Los Angeles, 2007.
- [148] T. B. Reddy, S. Sriram i B. S. Manoj, „MuSeQoR: Multi-path failure-tolerant security-aware QoS routing in Ad hoc wireless networks,” *Computer Networks*, nr 50, pp. 1349-1383, 2006.
- [149] G. Punz, *Evolution of 3G Networks: The Concept, Architecture and Realization of Mobile Networks Beyond UMTS*, New York: Springer, 2010.
- [150] M. Pioro i D. Medhi, *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2004.
- [151] O. Ozkasap i M. Caglar, „Traffic characterization of transport level reliable multicasting: Comparison of epidemic and feedback controlled loss recovery,” *Computer Networks*, nr 50, p. 1193-1218, 2006.
- [152] R. Diestel, *Graph Theory*, 4 red., New York: Springer, 2010.
- [153] G. Chartrand, *Introductory Graph Theory*, New York: Dover Publications, 1984.
- [154] N. Boccara, *Modeling Complex Systems*, 2 ed., New York: Springer, 2010.
- [155] C. S. Wasson, *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [156] R. B. Northrop, *Introduction to Complexity and Complex Systems*, New York: CRC Press, 2010.
- [157] R. Ganesh i K. Pahlavan, *Wireless Network Deployments*, Chichester: Springer, 2010.
- [158] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunication*, III red., Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [159] I. N. Bronsztejn i K. A. Siemiendajew, *Matematyka - poradnik encyklopedyczny*, XiX red., Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002.
- [160] E. May, *Wireless Communications & Networks*, 2 red., New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [161] M. Yuce i K. Jamil, *Wireless Body Area Networks: Technology, Implementation, and Applications*, Singapore: Pan Stanford Publishing, 2011.
- [162] F. Dowla, *Handbook of RF and Wireless Technologies*, Burlington: Elsevier, 2004.
- [163] R. B. Northrop, *Introduction to Complexity and Complex Systems*, New York: CRC Press, 2010.
- [164] N. Boccara, *Modeling Complex Systems*, 2 red., New York: Springer, 2010.
- [165] J. Balcerzak i J. Panasiuk, *Wprowadzenie do kartografii matematycznej*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.

- 
- [166] B. Zagajewski, A. Jarocińska i D. Olesiuk, *Metody i techniki badań geoinformatycznych*, Warszawa: Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, 2008.
- [167] E. A. Bowser, *A Treatise On Plane and Spherical Trigonometry: And Its Applications to Astronomy and Geodesy*, London: Nabu Press, 2010.
- [168] B. Hofmann-Wellenhof, *Physical Geodesy*, 2 red., New York: Springer, 2006.
- [169] J. Casey, *A Treatise On Spherical Trigonometry, And Its Application To Geodesy And Astronomy*, London: Hervey Press, 2011.
- [170] M. D. Yacoub, *Wireless Technology: Protocols, Standarts, and Techniques*, New York: CRC Press, 2002.
- [171] K. Pahlavan and A. H. Levesque, *Wireless information networks*, New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [172] M. Hajder, A. Filipaik-Karasińska and P. Dymora, *The effective coverage in wireless regional networks*, Poznan: Poznan University of Technology Academic Journals - PWT, 2007.
- [173] S. Bac i R. Marian, *Meteorologia i klimatologia*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Naukowe, 1981.



*Panta rhei* – to stwierdzenie Heraklita z Efezu doskonale ilustruje funkcjonowanie współczesnego świata. Choć odnosimy go głównie do sfery społecznej, to w ciągłym ruchu znajduje się cała otaczająca nas rzeczywistość. Coraz częściej pojawiające się katastrofy są, przede wszystkim, rezultatem permanentnych zmian środowiskowych, zachodzących również na skutek działalności człowieka. W języku potocznym, katastrofa, to nagła zmiana charakterystyk otaczającego nas świata. Może mieć ona charakter twórczy, pozytywnie przekształcający otoczenie lub destrukcyjny, negatywnie wpływający na środowisko i społeczeństwo.

Analizą zagrożeń zajmuje się fundamentalna dyscyplina naukowa, nazywana ogólną teorią bezpieczeństwa. Pierwszoplanowym obiektem badań teorii jest określenie fundamentalnych prawidłowości przejścia naturalnych systemów przyrodniczych, obiektów technicznych, sfery biologicznej i struktur społeczno-gospodarczych ze stanu normalnego funkcjonowania, do stanu awaryjnego lub katastroficznego, a także zasad ich wzajemnego współdziałania w procesie wspomnianej zmiany stanu. Ponadto, ogólna teoria bezpieczeństwa zajmuje się budową naukowych podstaw diagnozowania, monitoringu i prognozowania zagrożeń, a także metodami przeciwdziałania katastrofom i likwidacji ich skutków. Niniejsza monografia jest wkładem interdyscyplinarnego zespołu autorów w jej rozwój.

