

P 2952/37

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

GÓRNICTWO

**Z. 115
GLIWICE
1982**

P 3351/82

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 716



JÓZEF SUŁKOWSKI

**METODY ODWZOROWANIA
I MIARY STRUKTUR
KOPALNIANYCH SIECI
WENTYLACYJNYCH**

G L I W I C E

1 9 8 2

OPINIODAWCA

Prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Jan Bandrowski (redaktor naczelny), Mirosław Chudek (redaktor działu),
Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Anna Błażkiewicz

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 180+85 Ark. wyd. 9,6 Ark. druk. 9,75 Papier drukowy kl. V, 70x100, 70 g
Oddane do druku 18.03.1982 Podpis. do druku 19.05.1982 Druk ukończ. w czerwcu 1982
Zamówienie 226/82 B-23 Cena zł 24,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WPROWADZENIE	5
2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY	10
3. ODWZOROWANIE STRUKTURY TOPOLOGICZNEJ SIECI WENTYLACYJNEJ	14
3.1. Rozmytość struktury sieci wentylacyjnej	14
3.2. Określenia grafu rozmytego	15
3.3. Reprezentacja geometryczna i macierzowa grafu rozmytego ...	17
3.4. Schemat kanoniczny jako geometryczna reprezentacja grafu zwykłego	18
3.5. Schemat kanoniczny rozmyty z liczbową funkcją przynależno- ści bocznic	19
3.6. Schemat kanoniczny rozmyty z graficzną funkcją przynależno- ści bocznic	22
3.7. Hipergrafy i ich przekształcenie w graf liniowy	26
3.8. Hiperschemat kanoniczny zwykły i rozmyty	31
4. ODWZOROWANIE STRUKTURY PRZEPŁYWOWEJ KOPALNIANEJ SIECI WENTYLA- CYJNEJ	36
4.1. Sieć wentylacyjna jako pojęcie formalne	36
4.2. Funkcje przepływowa i potencjalna sieci	37
4.3. Odwzorowanie sieci wentylacyjnej w postaci sieci wielobie- gunowej	40
4.4. Równoważność przepływowa sieci wentylacyjnych o przekształ- conej strukturze	43
4.5. Przekształcanie struktury topologicznej w strukturę prze- pływową	50
4.6. Odwzorowanie struktury przepływowej sieci rozmytej	56
4.7. Odwzorowanie sieci wentylacyjnej na płaszczyźnie	60
5. IDENTYFIKACJA STRUKTURY FUNKCJONALNO-NIEZAWODNOŚCIOWEJ SYSTEMU WENTYLACYJNEGO	65
5.1. System wentylacyjny kopalni	65
5.2. Niezawodność funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni.	66
5.3. Struktura systemu i jego opis przez wejścia-wyjścia	72
5.4. Wiąz funkcjonalna między odbiorami powietrza o elementami podlegającymi wymuszeniu	76
5.5. System wentylacyjny jako system logiczny kombinacyjny	77
5.6. Identyfikacja struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjne- go	78
5.7. Identyfikacja struktury niezawodnościowej systemu wentyla- cyjnego kopalni	84

P 239/82

	Str.
6. LICZBOWE MIARY STRUKTURY SIECI I SYSTEMU WENTYLACYJNEGO	90
6.1. Równoważność struktur sieciowych	90
6.2. Podobieństwo topologiczne sieci wentylacyjnych	91
6.3. Przegląd liczbowych miar struktury sieci lub systemu znanych w literaturze	96
6.4. Miara złożoności struktury	99
6.5. Miara zwartości struktury	103
6.6. Związek gęstości grafu z miarami liczbowymi struktury sieciowej	105
6.7. Związki między złożonością i zwartością struktury sieci wentylacyjnej	108
7. NIEKTÓRE ZASTOSOWANIA	115
7.1. Stosowanie schematów wentylacyjnych rozmytych w analizie sytuacji pożarowych	115
7.2. Projektowanie rozmieszczenia czujników wydatku przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej	121
7.3. Analiza możliwości ewakuacji górników z zagrożonego rejonu kopalni	128
7.4. Ocena efektywności funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni	132
8. ZAKOŃCZENIE	141
8.1. Wnioski ogólne	141
8.2. Uwagi końcowe	143
LITERATURA	145
STRESZCZENIA	153

1. WPROWADZENIE

Wyrobiska górnicze są w konkretnej kopalni powiązane w pewną całość, a płynące nimi prądy powietrza wzajemnie na siebie oddziałują. Mówimy, że tworzą one układ elementów wyraźnie wyodrębniony z otoczenia, jakim jest górotwór, atmosfera ziemska, a także wyrobiska i prądy powietrza innych, sąsiednich kopalń.

Obok wyrobisk górniczych zidentyfikowanych pod względem właściwości i nie podlegających przy ich rozpatrywaniu dalszemu rozbiciu na części elementami układu są jeszcze połączenia wyrobisk oraz urządzenia wentylacyjne, takie jak: wentylatory główne, wentylatory pomocnicze, tamy wentylacyjne, przepierzenia, zasłony, zasuwy, mosty wentylacyjne. Opisany w ten sposób układ wyrobisk i urządzeń wentylacyjnych nazywany jest kopalnianą siecią wentylacyjną. Celem jej istnienia jest dostarczanie powietrza w odpowiedniej ilości i jakości do miejsc pracy górników, komór funkcyjnych, miejsc szczególnie intensywnego wydzielania się lub dopływu ciepła oraz odprowadzenie z tym powietrzem wydzielających się lub tworzących gazów, pyłów, dymów, pary wodnej i ciepła. W kopalnianej sieci wentylacyjnej realizowana jest więc wymiana materii między nią a otaczającą atmosferą i współdziałanie to jest cechą układu względnie odosobnionego - jednego z podstawowych pierwotnych pojęć cybernetyki [9, 70, 104]. Wymiana powietrza kopalnianego z otaczającą atmosferą przybiera postać zasilenia materialno-energetycznych realizowanych poprzez tzw. wejścia i wyjścia sieci wentylacyjnej, czyli wszelkie drogi i sposoby oddziaływania atmosfery zewnętrznej na sieć wentylacyjną i odwrotnie. Można więc rozróżnić to oddziaływanie jako wymuszenie na sieci wentylacyjnej bądź jej reakcję.

Kopalniana sieć wentylacyjna jest celowo zorganizowanym układem wyrobisk i urządzeń wentylacyjnych, a więc - jako taka - jest systemem wentylacyjnym. Zgodnie z pracami [18, 61, 70, 74, 164] systemem nazywany jest celowo określony zbiór elementów oraz relacji między tymi elementami oraz między ich właściwościami.

Powyższa, mnogościowa definicja systemu jest najbliższa jego intuicyjnej interpretacji, ale jest tylko jedną z możliwych [86].

Utrzymanie wymaganych warunków funkcjonowania systemu, a więc i zapewnienie realizacji celu postawionego przed nim, osiąga się za pomocą sterowania, czyli celowego oddziaływania na określone elementy systemu [27, 70, 104, 105]. W związku z tym ze zbioru elementów systemu, oprócz innych elementów, można wydzielić dwie szczególne grupy: urządzenia sterujące i obiekty sterowania. Urządzeniami sterującymi w kopalnianym systemie wen-

tylacyjnym będą tamy wentylacyjne, wentylatory pomocnicze i inne urządzenia powzechnie zwane regulacyjnymi. Obiektami sterowania będą natomiast wyrobiska górnicze odbierające i zużytkowujące dostarczane powietrze (miejsca pracy, komory itp.). Z tego względu przy analizie funkcjonowania systemu ważniejsze znaczenie mogą mieć relacje występujące między wyróżnionymi powyżej elementami funkcjonalnymi [21] aniżeli relacje bezpośredniego sprzężenia fizycznego. Najistotniejszym procesem w systemie staje się wtedy przetwarzanie informacji. Systemy fizyczne, takie jak system wentylacyjny kopalń, funkcjonują w warunkach działania wielu czynników przypadkowych, związanych ze stanami wewnętrznymi systemu oraz wpływem otoczenia. Działania ich prowadzą do zmiany charakterystyk elementów lub zmiany współdziałania między elementami i zdarzenie to nazywane jest uszkodzeniem elementu [21, 57, 143].

Funkcjonowanie systemu może być więc rozpatrywane z pozycji jego odporności na działanie czynników zakłócających i zdolności do skutecznego osiągnięcia postawionego celu. Mówimy wtedy o niezawodności funkcjonowania systemu [27], a wyróżnione relacje (związki) niezawodnościowe mogą obejmować również te elementy systemu, które nie mają znaczenia, na przykład w procesie sterowania. W systemie wentylacyjnym mamy wreszcie do czynienia z przepływem powietrza, co upodabnia go do innych systemów fizycznych z przepływem pewnych mediów, substancji lub ładunków, na przykład wody, energii, ładunku elektrycznego itp. Cechą charakterystyczną takich systemów przepływowych jest istnienie przewodów, przez które może przepływać dana substancja czy ładunek i w czasie przepływu podlega prawu zachowania masy [50, 133]. Powiązania między elementami systemu są powiązaniami fizycznymi, celowo skonstruowanymi, a więc architektonicznymi. Elementy systemu przepływowego, ze względu na sposób zachowania się w systemie, określić można jako pasywne [70] - nie uczestniczące w wykonywaniu żadnych czynności. Systemy przepływowe są szczególnym rodzajem systemów transportowych, w których przemieszczanie materii lub energii nie musi być uwarunkowane istnieniem przewodów materialnych. Natomiast bardzo często system przepływowy utożsamiany jest z siecią przepływową i stosowana nazwa "kopalniana sieć wentylacyjna" jest podobnym zawężeniem pojęcia kopalnianego systemu wentylacyjnego" do jego interpretacji przepływowej. Wprowadzenie elementów aktywnych (np. urządzeń regulacyjnych), co jest wynikiem potrzeby sterowania, czyni z sieci wentylacyjnej system wentylacyjny. Nadmienić przy tym należy, że na przykład tamy regulacyjne mogą być traktowane jako elementy przepływowe pasywne, jeśli rozpatrujemy stan statyczny systemu wentylacyjnego lub jako elementy aktywne w procesie sterowania systemem. Podział elementów na pasywne bądź aktywne jest podziałem z punktu widzenia energetycznego, w zależności od tego, czy energia jest w elemencie dyssypowana lub doprowadzana. W aerologii górniczej używa się zamiennie pojęć "sieć" i "system" wentylacyjny, przy czym wyraźnie zaniechano używania nazwy "system" dla określenia układów prądów powietrza, a więc w rozumieniu H. Czeczotta, W. Budryka [26, 42].

Istotną właściwością sieci bądź systemu jest ich struktura, która określa sposób wzajemnego powiązania (relacji) elementów. Między dwoma elementami systemu może istnieć kilka różnych relacji. Jedne mogą wynikać z istnienia sprzężenia fizycznego, inne z powiązania funkcjonalnego, jeszcze inne z połączenia informacyjnego. Relacje występują bowiem między elementami fizycznymi tworzącymi system bądź między cechami tychże elementów.

W opisie matematycznym przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej lub opisie funkcjonowania systemu wentylacyjnego struktura jest równie ważnym parametrem jak i parametry powietrza ("materiałowe") lub własności elementów sieci i systemu. W odróżnieniu od pozostałych parametrów jest ona trudniejsza do scharakteryzowania ilościowego. Wzrost szczególności matematycznego opisu przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej następuje poprzez zwiększenie liczby zmiennych i dokładniejszą reprezentację parametrów - aż do traktowania ich jako wielkości losowych (np. opór aerodynamiczny wyrobiska). Stąd też wynika potrzeba wiernego i dokładnego odwzorowania struktury rzeczywistych sieci wentylacyjnych kopalń.

Z dotychczas opublikowanych prac zawierających wyniki badań nad odwzorowaniem i właściwościami struktury sieci wentylacyjnej wymienić należy przede wszystkim prace H. Czeczotta [42, 43]. Stworzył w nich bowiem tzw. schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej, będący abstrakcyjnym obrazem jej struktury oraz wykrył podstawowe własności prądu przekątnego powietrza.

Prace Czeczotta kontynuował W. Budryk [25] wprowadzając schemat kanoniczny zamknięty, który umożliwia odwzorowanie sieci wentylacyjnej łącznie z otoczeniem, a dzięki wtórnemu rozcinaniu sieci umożliwia wyodrębnienie otoczenia dla jej dowolnego elementu. Dzięki temu wynikowi mógł Budryk stworzyć teorię stabilizacji prądów powietrza w czasie pożarów [24, 25].

Odwzorowanie macierzowe struktury sieci wentylacyjnej w postaci tzw. tablicy strukturalnej podał po raz pierwszy J. Litwiniszyn [91]. Znalazło ono zastosowanie przy konstrukcji analogów elektrycznych i w teorii rozmieszczenia detektorów dymów pożarowych.

H. Bystróż [28, 29] przeanalizował problem wieloznaczności kreślenia schematów kanonicznych w aspekcie praktycznego zastosowania ich w zagadnieniach wentylacyjno-pożarowych. Sformułował zasady kreślenia schematów i wykrył oryginalny sposób klasyfikacji charakteru prądów sposobem dróg niezależnych. Podał też metody odwikłania powikłanych wieloznacznych schematów kanonicznych - będące formami ich uproszczenia postaciowego. Autor [135] uzupełnił te wyniki przez podanie kryterium topologicznego odwikłania schematów, a Miękus i współautorzy [100] dzięki opracowaniu metody macierzowego jednoznaczego wyznaczania schematów kanonicznych. Bystróż stworzył też w 1950 r. schemat potencjalny jako dalsze rozwinięcie schematu kanonicznego Czeczotta dzięki jego skalibrowaniu wartościami potencjału. Schemat ten znalazł szerokie zastosowanie w analizie bezpieczeństwa i ra-

cyjności sieci wentylacyjnych [33]. Podstawy termodynamiczne schematu potencjalnego zawarte w monografii [34] stały się inspiracją rozwoju nowego kierunku badań w aerologii górniczej.

S. Barczyk [13] wykorzystał pojęcie przekroju kanonicznego do bilansowania przepływów powietrza w sieci wentylacyjnej w czasie pożaru i wyjaśnienia tzw. wpływu bocznego. Scott i Hinsley [124] wykorzystali analogię sieci wentylacyjnej z innymi sieciami przepływowymi i jako pierwsi rozwinęli metodę H. Crossa dostosowując ją do obliczeń rozprzysku powietrza w sieciach wentylacyjnych.

Kompleksowy opis struktury sieci wentylacyjnej z wykorzystaniem podstawowych pojęć teorii grafów zawiera praca Soulle'a [129]. Szczególne znaczenie dla dalszego rozwoju teorii struktury sieci wentylacyjnej miało wykorzystanie w tej pracy pojęcia dendrytu sieci i liczby cyklomatycznej umożliwiających wybór w sieci cykli liniowo niezależnych. Soulle zauważył też, że przy tworzeniu schematu kanonicznego sieci wentylacyjnej dokonuje się abstrakcji w dwóch etapach: w pierwszym - przejście od rzeczywistości fizycznej do obrazu geometrycznego; w drugim - przejście od obrazu geometrycznego do struktury topologicznej. Dalszymi pracami wykorzystującymi elementy teorii grafów były prace Bagrinowskiego [11], Coja i Rogowa [39] oraz Gustkiewicza [60]. Rozszerzyły one teorię struktury sieci wentylacyjnej w zagadnieniach relacji między elementami sieci i analizowały różnorodne odwzorowania macierzowe struktury.

Prace Aprilego i Sciorty [7, 8, 123] rozwinęły i zmodyfikowały pomysł Protodiakonowa dotyczący rozszczepienia prądów na prądy cząstkowe, wykorzystując pojęcie prądów cyklowych (oczkowych) Maxwella. Podobną ideę rozkładu prądów podał też w 1961 r. Litwiniszyn, stosując ją dla ułożenia równań przepływu w całej sieci wentylacyjnej.

Problemu przekształcania struktury sieci wentylacyjnej dotyczą też prace Bystronia [30, 31, 32]. Po raz pierwszy zastosowano w nich przekształcenie zachowujące identyczny rozprzysk powietrza, lecz nie będące homeomorfizmem - tak zwane przeszczepienie bocznice. Wprowadzono też inne uproszczenie struktury sieci poprzez tworzenie tak zwanej sieci zredukowanej.

Odmienne sposoby przekształcania struktury sieci, polegający na zlepianiu węzłów z bocznicami w miejscu o równych potencjałach, podali Coj i Riazancew [40]. Autor [137] wykorzystał tę ideę dla przybliżonego przekształcania struktury sieci wykazując jego dualizm z przekształceniem Aprilego.

W niektórych pracach postawiono problem tak zwanej prostej struktury sieci wentylacyjnej. Praktyka górnicza żąda bowiem, aby struktura sieci zapewniała: wysoką stabilność systemu wentylacyjnego, łatwość sterowania procesem przewietrzania, szybką i dokładną analizę numeryczną stanu przewietrzania, dokładniejsze opracowywanie planów likwidacji awarii wentylacyjnych, łatwą orientację górników w czasie ucieczki z miejsc zagrożonych.

Budryk [24] określił system wentylacyjny spełniający podobne wymagania jako system racjonalny, a zasadniczym warunkiem jego istnienia była odpowiednia struktura systemu objawiająca się występowaniem tylko prądów niezależnych. "Skomplikowana i zagmatwana sieć" miała cechować kopalnie w przeszłości [24], ale przykład pożaru w kopalni "Manifest Lipcowy" świadczy, że problem nie jest dalej rozwiązany i skomplikowana struktura sieci ciągle utrudnia zwalczanie pożarów [115]. Podobnie jak Budryk również Klebanow i Roasoczynski [71] wskazują na strukturę szeregowo-równoległą (normalną) jako najbardziej pożądaną dla sieci wentylacyjnej. Uzasadniają to dobrymi własnościami systemów naturalnych (np. krwionośnego), które cechują się brakiem połączeń przekątnych. Z kolei według badań Mestera i Zasuchina [99] sieci zawierające prądy przekątne między prądami wylotowymi z rejonów są trudnosterowalne z punktu widzenia teorii automatycznej regulacji.

Jednakże stosowanie, w odniesieniu do struktury sieci wentylacyjnej kopalni, terminów "prosta", "zagmatwana", "złożona" czy "skomplikowana" nie opiera się na ogół na liczbowo określonych miarach. Próby formalizacji terminów i ilościowej oceny reprezentowanych przez nie cech struktury znajdujemy w pracach Słepycha i współautorów [125] i Coja [40] w postaci pewnych funkcji parametrów struktury, a także w pracach Litwiniszyna [95] i Trutwina [148] uwzględniających parametry obciążenia bocznice sieci liczbą pracujących ludzi lub wartością prawdopodobieństwa pojawienia się pożaru.

Problem analizowany był również przez autora w pracach [136, 138, 140].

2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem pracy jest struktura kopalnianej sieci wentylacyjnej odwzorowana w formie modeli, nazywanych schematami wentylacyjnymi.

Przy odwzorowywaniu struktury sieciowej stosowane być muszą modele zapewniające ich podobieństwo strukturalne z oryginałem (siecią rzeczywistą). Podobieństwo strukturalne może być dwójakiego rodzaju: izomorficzne lub homomorficzne. Oryginał i model mają strukturę izomorficzną, jeśli wszystkie elementy i ich powiązania w oryginale są wzajemnie jednoznacznie przyporządkowane elementom i ich powiązaniom w modelu. Oryginał i model mają strukturę homomorficzną, jeśli określonym elementom i ich powiązaniom w oryginale odpowiadają określone elementy i ich powiązania w modelu - ale nie na odwrót. Wystarcza więc w tym przypadku, aby ich struktury miały zgodne cechy, natomiast liczba elementów może być różna. Homomorfizm oznacza więc uproszczenie odwzorowywanej struktury sieciowej.

Dotychczasowe sposoby odwzorowania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej opierają się najczęściej na założeniu adekwatności modelu z rzeczywistą strukturą. Przyjmuje się więc (na ogół w sposób niejawną) założenie o istnieniu podobieństwa izomorficznego sieci rzeczywistej i jej schematu przestrzennego lub kanonicznego. Odwzorowanie izomorficzne struktury sieci wentylacyjnej w postaci map i schematów wentylacyjnych jest stosowane przede wszystkim do funkcjonowania systemu wentylacyjnego w warunkach normalnych. Toteż widoczna w nich odrębność wentylacyjna rejonów czy nawet poszczególnych wyrobisk między sobą jest w wielu przypadkach pozorna. W warunkach pojawienia się zagrożenia gazami (metanem, gazami pożarowymi) istniejące oddzielenie rejonów wentylacyjnych bądź wyrobisk nie zapobiegnie przeniesieniu się gazów między nimi, a sformułowana na podstawie niepełnego odwzorowania struktury sieci wentylacyjnej ocena sytuacji metanowej lub pożarowej może tego faktu nie uwzględniać.

Okazuje się często, że z powodu zakwalifikowania niektórych przepływów powietrza jako "nieistotnych" nie są one odwzorowywane w żadnym (formalnym lub nieformalnym) modelu struktury sieci - a tym samym nie są kontrolowane.

Praktyka górnicza wykazuje więc, że z powodu uproszczeń dokonywanych w czasie odwzorowania sieci wentylacyjnej, a związanych z niską określonością informacyjną sytuacji wentylacyjnej, nie ma zakładanej adekwatności struktur oryginału i modelu.

Oczywiście są też przypadki odwzorowania, o którym z góry zakłada się, że będzie uproszczone mimo pełnego rozeznania rzeczywistości. Dotyczą one

odwzorowania struktury sieci dla celów poglądowych, a nawet dla celów obliczeń sieci - o ile postawione zadanie jest dostatecznie ogólne i można zaniedbać słabe oddziaływania między elementami sieci. W sytuacjach awaryjnych stawia się jednak zadania bardzo szczegółowe i uproszczona struktura sieci wentylacyjnej zawiera za mało informacji. Zatem dla uściślenia struktury i uzyskania pełniejszego obrazu sytuacji awaryjnej sięga się przede wszystkim po świadków wielu zdarzeń poprzedzających awarię (np. wykonawców robót górniczych prowadzonych w tym polu) i wykorzystuje się bezpośrednio doświadczenie oraz intuicję inżynierów wentylacji.

Godny podkreślenia jest fakt, że struktura sieci wentylacyjnej nie może być całkowicie poznana. Nie jest ona bowiem siecią techniczną, której wszystkie elementy są projektowane (a tym samym mogą być dokładnie zrealizowane), lecz jest siecią tworzoną przeciw siłom przyrody, wciąż słabo poznany.

Współ z pożądanymi i zaplanowanymi wyrobiskami powstają przypadkowe szczeliny w masywie skalnym, zrobach lub też likwidacja wyrobisk niepotrzebnych nie jest dokładna. Nie można więc wytyczyć "granicy" oddzielającej zbiór elementów należących do sieci od nie należących i określić, jaki rodzaj podobieństwa realizuje odwzorowany model. W rozdziale następnym stawiamy jednak tezę, że można zbudować model struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej, którego adekwatność z oryginałem nie będzie rozpatrywana z pozycji izomorfizmu. Struktura kopalnianej sieci wentylacyjnej jest bowiem przykładem nieprecyzji, niedokładności oraz nieokreśloności otaczającego nas świata rzeczywistego. Dla jego opisu L. Zadeh [160] wprowadził pojęcie zbioru rozmytego cechującego się brakiem ostrej granicy pomiędzy przynależnością i nieprzynależnością elementów.

Celem rozdziału 3 jest więc opracowanie metody odwzorowania struktury topologicznej sieci wentylacyjnej przy założeniu, że zbiór jej elementów jest zbiorem rozmytym. Posłużymy się w nim pojęciami grafu i multigrafu rozmytego (zdefiniowanymi odmiennie w stosunku do propozycji znanych w literaturze) oraz ich reprezentacjami geometrycznymi i macierzowymi. Tworzenie schematów kanonicznych rozmytych oprzemy na liczbowych i graficznych funkcjach przynależności bocznic. Mają one ułatwić praktyczne zastosowanie schematów i hiperschematów kanonicznych rozmytych, a przede wszystkim zmienić sposób myślenia o sieci wentylacyjnej jako o obiekcie fizycznym posiadającym "granice" ukształtowane przebiegiem wyrobisk "wentylacyjnie czynnych". Dla modelowania niektórych części sieci zawierających elementy o więcej niż dwóch krańcach, np. pola pożarowe, stare zrobry, uproszczone rejon wentylacyjny, proponujemy odwzorowanie w postaci hiperschematu kanonicznego rozmytego.

Celem rozdziału 4 jest opracowanie podobnej metody odwzorowania w odniesieniu do struktury przepływowej sieci wentylacyjnej. Terminy: "sieć wentylacyjna", "prąd powietrza" zdefiniowane zostaną jako pojęcia formalne, o ściśle określonym znaczeniu. Wykażemy równocześnie, że pomiędzy

wszystkimi węzłami sieci wentylacyjnej zrealizowany jest przepływ maksymalny, czyli jest ona siecią z maksymalnymi przepływami wielokierunkowymi w sensie Forda-Fulkersona [50]. Z tego względu sieć wentylacyjną nie musi być odwzorowana tylko jako sieć dwubiegunowa. Zaproponujemy więc metodę przekształcania odwzorowanej sieci dwubiegunowej w równoważną przepływowo sieć wielobiegunową i zbadamy jej własności. Odwzorowania rozmytej struktury przepływowej sieci wentylacyjnej proponujemy dokonać poprzez wyznaczenie funkcji przynależności prądów powietrza lub posługiwanie się odwzorowaniem rozmytej struktury topologicznej. Istotnym problemem przy odwzorowaniu struktury jest nieplanarność większości sieci wentylacyjnych. Dla badania planarności sieci przystosujemy kryterium Kuratowskiego [88].

Rozdział 5 traktuje o strukturze funkcjonalno-niezawodnościowej systemu wentylacyjnego. Jego celem jest opracowanie metody wyznaczania tej struktury przy założeniu, że funkcjonowanie systemu rozpatrywane jest z pozycji niezawodności. Stawiamy przy tym tezę, że strukturę funkcjonalną systemu wentylacyjnego wyraża funkcja przetwarzająca zmiany oporów bądź charakterystyk elementów uszkodzalnych na zmiany wydatków lub naporów, a więc zależna jest ona tylko pośrednio od struktury topologicznej. Zakładając, że zarówno elementy charakteryzujące wejścia, jak również elementy charakteryzujące wyjścia opisane są zmienną binarną, można system wentylacyjny sprowadzić do systemu logicznego kombinacyjnego. Wtedy elementy wejść i wyjść oraz powiązania między nimi tworzyć będą graf-zorientowany G . Problem identyfikacji struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjnego sprowadzamy do uściślenia postaci grafu G wykorzystując obliczenia symulacyjne przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej dla stanu normalnego oraz uszkodzeniowego. Dopiero uzyskana struktura funkcjonalna wykorzystana może być do wyznaczania struktury niezawodnościowej. Twierdzimy bowiem, że nie można w tym celu wykorzystywać struktury topologicznej lub przepływowej, jak u Coja i Bankina [122].

Celem rozdziału 6 jest opracowanie liczbowych miar struktury sieci wentylacyjnej dla ich oceny i porównywania. Równoważność struktur sieciowych pod względem topologicznym najlepiej wyraża równość niezmienników izomorfizmu. Twierdzimy jednak, że nie mogą być one wykorzystane do porównywania struktur sieci wentylacyjnych z powodu niepowtarzalności struktur sieci rzeczywistych. Zamiast równoważności posługiwać się należy podobieństwem topologicznym. W pracy wykorzystamy w tym celu ideę Korolackiego i Potiemkina [81], ale w odniesieniu do sieci wentylacyjnych rozmytych. Ponieważ naturalnym parametrem struktury sieciowej jest gęstość grafu, który ją reprezentuje, to konstruując inne miary liczbowe wywodzące się od gęstości grafu wyrazimy w sposób ilościowy takie cechy struktury sieci wentylacyjnej, jak złożoność i zwartość.

W rozdziale 7 zawarto zastosowania niektórych wyników pracy. Omówiono możliwości wykorzystania schematów wentylacyjnych rozmytych do analizy sytuacji pożarowych na przykładzie pożarów w kopalniach "Polkowice" i "Si-

lesia" w 1979 r. Podano sposób projektowania rozmieszczenia czujników wydatku przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej oparty na analizie funkcjonowania systemu wentylacyjnego w warunkach uszkodzeń bocznic sieci. Stosując liczbowe miary struktury sieci porównano oddziały eksploatacyjne pod względem możliwości ewakuowania się górników. Na koniec dokonano oceny efektywności funkcjonowania systemu wentylacyjnego wykorzystując metodę identyfikacji jego struktury funkcjonalno-niezawodnościowej.

3. ODWZOROWANIE STRUKTURY TOPOLOGICZNEJ SIECI WENTYLACYJNEJ

3.1. Rozmytość struktury sieci wentylacyjnej

Sieć wentylacyjna, mimo że należy do grupy sieci przepływowych, nie jest typową siecią techniczną, jak na przykład sieć hydrauliczna, pneumatyczna lub gazowa. Elementy jej są nie tylko celowo włączane dzięki wykonywaniu wyrobisk, lecz również powstają samoistnie i przypadkowo w caliznie, zrobach lub podsadzce. Trudno też je z sieci odłączyć, gdyż izolacja tamami, gruzem skalnym, a nawet podsadzką hydrauliczną nie likwiduje całkowicie przepływu, a tym bardziej przenikania powietrza. W typowych sieciach technicznych rozmontowuje się określony fragment sieci i usuwa zbędny element lub wmontowuje się potrzebny.

Wyrobiska zlikwidowane posiadają nie tylko kontakt wentylacyjny (przepływowy) z wyrobiskami czynnymi, lecz tworzą także między sobą różnorodne połączenia "rozazierzając" tym samym strukturę sieci wentylacyjnej czynnej. W rzeczywistej sieci trudno jest wyznaczyć jej dokładne granice. Na przykład, zasada racjonalnego podziału sieci [24] na niezależne prądy powietrza przewietrzające wybrane miejsca (kompleksy wyrobisk) w kopalni zakłada możliwość całkowitego, fizycznego wyodrębnienia tych miejsc od siebie. Natomiast praktyka wskazuje, że stosowane oddzielenie wentylacyjne jest pod tym względem niewystarczające, zwłaszcza w warunkach wystąpienia zagrożenia gazowego lub pożarowego. Powstaje także problem właściwego odwzorowania struktury sieci wentylacyjnej zawierającej wyrobiska nie w pełni zlikwidowane lub różnego rodzaju szczeliny umożliwiające przepływ powietrza.

Elementy fizyczne rzeczywistej sieci wentylacyjnej (wyrobiska czynne, otamowane, zarabowane, szczeliny itp.) lub jej części tworzą zbiór o nieznanej liczności:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (3.1)$$

Jego podzbiór $A \subset Y$ zawierający elementy odwzorowane na mapie lub schemacie wentylacyjnym stanowi zbiór rozmyty w sensie Zadeha [160] utworzony z par uporządkowanych, co określimy formalnie:

$$\tilde{A} = \{y, \mu_A(y)\} \quad (3.2)$$

Pierwszym składnikiem pary jest element $y \in Y$, a drugim tzw. stopień przynależności elementu y do zbioru \tilde{A} reprezentowany przez funkcję przynależności μ_A przekształcającą zbiór Y w zbiór liczb rzeczywistych odcinka $[0,1]$, a więc:

$$\mu_A : Y \rightarrow [0,1] \text{ taka, że } \forall y \in Y \exists \mu_A(y) \in [0,1]$$

Ponieważ Y jest zbiorem dyskretnym, to zbiór rozmyty A można wyrazić również w postaci:

$$\tilde{A} = \mu_A(y_1)/y_1 + \mu_A(y_2)/y_2 + \dots + \mu_A(y_n)/y_n \quad (3.3)$$

Wybór funkcji przynależności jest subiektywny, gdyż opiera się na częściowej (np. z racji trudnej rozpoznawalności) informacji o elementach zbioru Y . Zastosowanie funkcji przynależności umożliwia jednakże określenie zbioru \tilde{A} , chociaż granica przynależności i nieprzynależności elementów do zbioru będzie nieostra. Zastępuje ona bowiem opis słowny elementów wentylacyjnych - operujący zmiennymi lingwistycznymi - przez wprowadzenie wartości liczbowych. Jeśli zbiór \tilde{A} byłby zbiorem konwencjonalnym, to funkcja przynależności μ_A jest identyczna z jego funkcją charakterystyczną χ i przyjmuje wartości 0 lub 1.

3.2. Określenie grafu rozmytego

Niech X będzie skończonym zbiorem elementów zwanych wierzchołkami. Jeśli dla każdego wierzchołka $x \in X$ zbiór jego następników $\Gamma(x)$ stanowi zbiór rozmyty w X , to para uporządkowana:

$$\langle X, \Gamma \rangle \text{ df } \tilde{G} \quad (3.4)$$

nazywana jest grafem rozmytym \tilde{G} . Definicję tę podał Takeda [145]. Funkcja Γ określona jest na zbiorze wierzchołków, a wartościami jej są odpowiednie podzbiory zbioru wierzchołków:

$$\Gamma : x \rightarrow 2^X \quad (3.5)$$

Zbiór $\Gamma(x)$ charakteryzuje się w (3.4) funkcją przynależności $\mu_{\Gamma(x)}$ przyjmującą wartości z przedziału $[0,1]$. Wartości funkcji $\mu_{\Gamma(x)}(y)$ dla $y \in X$ wyraża stopień przynależności y do zbioru $\Gamma(x)$.

Podobnie jednak określić można wartość $\mu_{\Gamma(y)}(x)$ wyrażającą stopień przynależności wierzchołka x do zbioru $\Gamma(y)$. Dla dwóch dowolnych wierzchołków x oraz y , związanych funkcją Γ , otrzymaliśmy więc dwie różne

wartości stopnia przynależności, w zależności od tego, który z nich weźmiemy jako następnik drugiego. Z tego względu nie można stopnia przynależności powiązać z krawędzią łączącą wierzchołki x oraz y . Jeśli wartości $\mu_{\tilde{R}}(x)(y)$ dla dowolnych $x, y \in X$ przyjmują tylko wartości 0 lub 1, to graf $G = \tilde{G}$ będzie zwykłym grafem liniowym Berge'a (bez pętli i krawędzi wielokrotnych). Graf Berge'a zdefiniować można również z wykorzystaniem relacji binarnej na zbiorze wierzchołków [4, 5, 7]. Wprowadzimy więc odmienną od Takedy definicję grafu rozmytego, nazywając nim parę uporządkowaną:

$$\langle X, \tilde{R} \rangle \stackrel{\text{df}}{=} \tilde{G} \quad (3.6)$$

gdzie: \tilde{R} jest relacją symetryczną binarną (dwuargumentową) rozmytą w sensie Zadeha [160, 161] na zbiorze wierzchołków X .

Relacja rozmyta \tilde{R} na zbiorze X jest to podzbiór rozmyty iloczynu kartezjańskiego $X \times X$, scharakteryzowany funkcją przynależności $\mu_{\tilde{R}}(x, y) \in [0, 1]$:

$$\tilde{R} = \{ \langle x, y \rangle, \mu_{\tilde{R}}(x, y) \} \quad (3.7)$$

Para (x, y) wierzchołków grafu \tilde{G} , dla których $x \tilde{R} y$, nazywana będzie inaczej krawędzią rozmytą \tilde{U}_k grafu rozmytego \tilde{G} . Z założenia o symetryczności relacji \tilde{R} mamy:

$$x \tilde{R} y \implies y \tilde{R} x \quad (3.8)$$

to znaczy jedna z tych relacji pociąga za sobą drugą i w interpretacji grafowej tworzą jedną krawędź bez orientacji bądź parę łuków przeciwnie skierowanych.

Para (x, y) jest parą nieuporządkowaną i będziemy przyjmować dalej interpretację relacji (3.8) w postaci krawędzi nieorientowanej. Pary nieuporządkowane (x, y) tworzą zbiór rozmyty krawędzi \tilde{U} . Stąd możemy także dla grafu rozmytego używać zapisu:

$$\tilde{G} = \langle X, \tilde{U} \rangle \quad (3.9)$$

Relację rozmytą \tilde{R} uogólnia się na dowolną liczbę argumentów [160, 161]. Rozmytą n -argumentową relację \tilde{R} w przestrzeni $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ nazywa się podzbiór rozmyty:

$$\tilde{R} = \{ \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle, \mu_{\tilde{R}}(x_1, x_2, \dots, x_n) \} \quad (3.10)$$

gdzie:

$$x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$$

Zbiór \tilde{R} charakteryzuje się funkcją n -zmiennych $\mu_{\tilde{R}}$ przyporządkowującą każdej n -ce $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ stopień $\mu_{\tilde{R}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ przynależności do zbioru.

W szczególności interesować nas będzie relacja rozmyta trójargumentowa $\tilde{P} \subset X \times U \times X$, zastosowana w teorii grafów przez Zykowę [165] umożliwiającą nam zdefiniowanie multigrafu rozmytego:

$$\tilde{G} = \langle X, U, \tilde{P} \rangle \quad (3.11)$$

gdzie:

- X - zbiór wierzchołków,
- U - zbiór krawędzi.

Relację \tilde{P} jest podzbiór rozmyty:

$$\tilde{P} = \{ \langle x, u, y \rangle, \mu_{\tilde{P}}(x, u, y) \} \quad (3.12)$$

gdzie dla każdej krawędzi $u \in U$ istnieje taka para wierzchołków $x, y \in X$, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ ze stopniem przynależności $\mu_{\tilde{P}}(x, u, y)$. Jeśli każdej krawędzi $u \in U$ odpowiada wzajemnie jednoznacznie jedna para wierzchołków $x, y \in X$ taka, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ ze stopniem przynależności $\mu_{\tilde{P}}(x, u, y)$, to zbiór U jest izomorficzny z relacją dwuargumentową $\tilde{R} \in X \times X$, a więc jest zbiorem rozmytym \tilde{U} . Uzyskaliśmy zatem przejście od określenia multigrafu (3.11) do określenia unigrafu, danego w postaci (3.6) lub (3.9). Pojęcie multigrafu rozmytego jest oczywistym rozszerzeniem pojęcia grafu (unigrafu) rozmytego, wynikającym z potrzeby uwzględnienia połączeń wielokrotnych między niektórymi wierzchołkami grafu.

3.3. Reprezentacja geometryczna i macierzowa grafu rozmytego

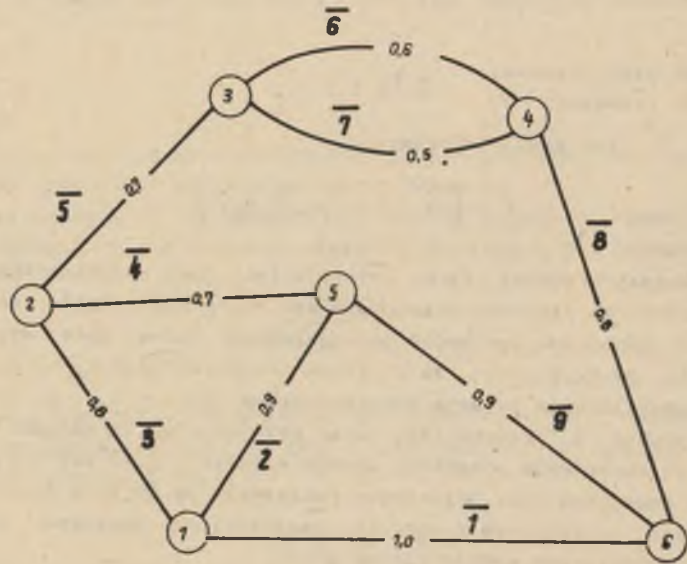
Przyporządkowując każdemu wierzchołkowi $x, y \in X$ takiemu, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ lub $\langle y, u, x \rangle \in \tilde{P}$, jeden dowolny punkt przestrzeni euklidesowej, a każdej krawędzi $u \in U$ takiej, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ lub $\langle y, u, x \rangle \in \tilde{P}$, dowolną linię łączącą wierzchołki x, y wraz z przyporządkowaną jej wartością stopnia przynależności $\mu_{\tilde{P}}(x, u, y)$, stwarzamy reprezentację geometryczną dowolnego multigrafu rozmytego \tilde{G} , będącego przecież (matematycznie) kombinatorycznym obiektem abstrakcyjnym. Otrzymujemy jedną z nieskończenie wielu figur geometrycznych reprezentujących dany multigraf. Rys. 3.1 ilustruje przykładową reprezentację multigrafu rozmytego $\tilde{G} = \langle X, U, \tilde{P} \rangle$, dla którego:

$$X = \{1, 2, \dots, 6\}$$

$$U = \{1, 2, \dots, 9\}.$$

a relacja rozmyta \tilde{P} zadana jest następującą tablicą:

x	1	1	1	2	2	3	3	4	5
u	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	6	5	2	5	3	4	4	6	6
μ_P	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,8	0,9



Rys. 3.1. Przykład multigrafu rozmytego $\tilde{G} = \langle X, U, P \rangle$ z wartościami stopnia przynależności przyporządkowanymi jego krawędziom

Reprezentację geometryczną multigrafu rozmytego realizuje się podobnie jak dla multigrafu zwykłego, z tym że każdej krawędzi przyporządkowuje się wartość stopnia jej przynależności do multigrafu G . Dla prostoty wielu sformułowań traktować będziemy, podobnie jak czynią to autorzy monografii o grafach, reprezentację geometryczną jako sam graf.

3.4. Schemat kanoniczny jako geometryczna reprezentacja grafu zwykłego

Stworzony przez Czeczotta [42, 43] schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej, rozwinięty później w pracach Budryka [24, 25], jest geometryczną reprezentacją konkretnego zwykłego grafu kombinatorycznego. Poddając przekształceniu homeomorficznemu schemat przestrzenny (lub izometryczny) uzyskał Czeczott figurę geometryczną, w której zachowały się - jako niezmienniki topologiczne - istotne właściwości struktury modelowanej sieci wentylacyjnej [92, 94].

Bocznica w schemacie kanonicznym jest więc innym terminem dla krawędzi w geometrycznej reprezentacji grafu kombinatorycznego. Odmienne nieco sposoby rysowania schematu kanonicznego jest różnicą nieistotną wobec nieskończonej liczby możliwych figur geometrycznych dla reprezentacji danego grafu. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej nie jest więc dokładnie grafem, lecz jego geometryczną reprezentacją. Traktowanie go jako grafu jest jednakże dopuszczalnym (zwłaszcza w technice) uproszczeniem.

Gdyby Czeczott próbował interpretować schemat kanoniczny jako pewien obiekt matematyczny, przyczyniłby się na pewno do wcześniejszego rozwoju teorii grafów. W ten sposób podwaliny teorii grafów, rozpoczęte słynną pracą L. Eulera (1736) poszerzyli G.R. Kirchhoff (1847) i J.C. Maxwell (1892), opracowując teorię drzew dla zastosowań w obwodach elektrycznych oraz A. Cayley (1857), stosując drzewa do przedstawienia cząstek organicznych w chemii.

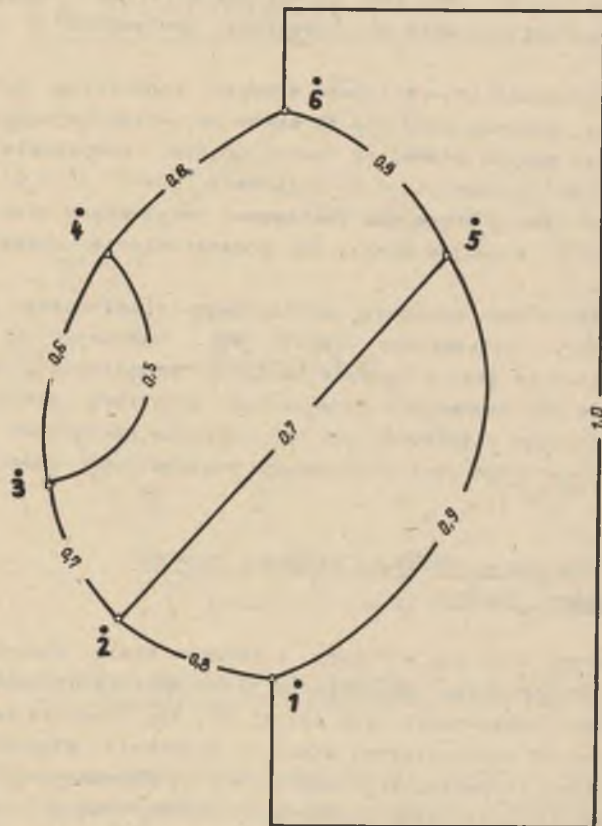
Reprezentację macierzową schematu kanonicznego - traktowanego jako graf - zastosował pierwszy Litwiniszyn (1949) [91], nazywając ją tablicą strukturalną. Tablica ta jest w istocie macierzą przyległości (połączeń) i znalazła pierwsze zastosowanie w modelowaniu struktury sieci wentylacyjnej za pomocą analogu elektrycznego [93]. Obecnie macierzowa reprezentacja schematu kanonicznego jest stosowana w przetwarzaniu komputerowym.

3.5. Schemat kanoniczny rozmyty z liczbowa funkcją przynależności bocznic

Schemat kanoniczny stał się w Polsce, a także w wielu innych krajach, zasadniczą formą odwzorowania kopalnianych sieci wentylacyjnych, wykorzystującą topologiczne właściwości tych sieci [28, 29]. Pozwala on na sprawne zapisanie struktury topologicznej sieci na podstawie własności incydencji jej elementów; jednakże określonych relację konwencjonalną.

Bocznice schematu kanonicznego modelują wyrobiska tzw. czynne wentylacyjnie, którymi płyną prądy powietrza. Prądy powietrza powinny zaś płynąć wszystkimi wyrobiskami, w których może przebywać człowiek. Takie wymagania wynika z wielu przepisów górniczych. Powietrze lub gazy pożarowe płyną również przez wyrobiska otamowane, podsadzone lub zarabowane przez różnego rodzaju szczeliny w zrobach, a także przez szczeliny w filarach bezpieczeństwa [131]. Różne jest więc znaczenie bocznic reprezentujących poszczególne wyrobiska lub szczeliny. Organizacji zbioru tych bocznic nie można zamodelować za pomocą konwencjonalnej relacji binarnej R , występującej w określeniu grafu, lecz za pomocą trójargumentowej relacji rozmytej \tilde{P} definiującej topologię multigrafu rozmytego \tilde{G} . Reprezentację geometryczną tego multigrafu będzie schemat kanoniczny rozmyty. Schemat kanoniczny rozmyty stanowi więc poszukiwany model (3.11) odwzorowujący strukturę topologiczną rzeczywistej sieci wentylacyjnej.

Powstaje oczywiście problem wyznaczenia wartości stopnia przynależności danej bocznicy do relacji \bar{P} . Dla znanych wartości funkcji przynależności μ_P otrzymalibyśmy na przykład schemat kanoniczny rozmyty jak na rys. 3.2. Stanowi on przekształcenie izomorficzne multigrafu rozmytego z rys. 3.1.



Rys. 3.2. Schemat kanoniczny rozmyty izomorficzny do multigrafu rozmytego z rys. 3.1

Wybór funkcji przynależności jest w ogólnym przypadku subiektywny. W literaturze [83] proponuje się nawet wykorzystywać oceny ekspertów. Ponieważ jednak obiektywnym parametrem charakteryzującym możliwości przepływu powietrza i gazów w wyrobisku górniczym bądź szczelinie w górotworze czy zrobach jest ich opór aerodynamiczny, można funkcję przynależności danej bocznicy do zbioru rozmytego określić następująco:

$$\mu_P(x,u,y) = \frac{1}{1 + R(u)} \quad (3.13)$$

gdzie:

$R(u)$ - opór aerodynamiczny bocznicy u , $N \cdot s^2/m^8$.

Na przykład dane są opory bocznicy: $R(15) = 0,01$, $R(21) = 0,2$, $R(42) = 1$, $R(73) = 9$, $R(122) = 99$, $R(160) = 499$.

Zatem relacja \bar{P} zadana będzie w postaci tablicy:

x	... 14 ... 19 ... 30 ... 41 ... 53 ... 65
u	... 15 ... 21 ... 42 ... 73 ... 122 ... 160
y	... 16 ... 23 ... 35 ... 44 ... 63 ... 68
μ_P	... 0,99 ... 0,833 ... 0,5 ... 0,1 ... 0,01 ... 0,002

Wartości oporów bocznicy mogą wynosić od zera (np. dla bocznicy zamykającej sieć przez atmosferę zewnętrzną) do kilkuset $N \cdot s^2/m^8$. W pracy [66] analizowano statystycznie występowanie oporów wyrobisk nieotamowanych w sieciach wentylacyjnych kopalń projektowanych stwierdzając zakres występowania wartości oporów bocznicy od 0 do 1000 M (około $10 N \cdot s^2/m^8$). Bocznice o oporze poniżej $0,01 N \cdot s^2/m^8$ stanowiły 15,4% zbioru, poniżej $0,1 N \cdot s^2/m^8$ 44,1%, a poniżej $1 N \cdot s^2/m^8$ aż 86% analizowanego zbioru.

Podobnej analizie uwzględniającej bardzo duże opory bocznicy (wyrobiska otamowane, wyrobiska odizolowane korkami podsadzkowymi, szczeliny w zrobach, filarach itp.) dotąd nie przeprowadzono. Sądzić jednak należy, że udział bocznicy o oporze poniżej $1 N \cdot s^2/m^8$ obniży się o kilkanaście procent, tak więc wartość $\mu_P \geq 0,5$ stopnia przynależności obliczona wg (3.13) przyporządkowana będzie około połowie zbioru bocznicy sieci wentylacyjnej.

Trudnością w zastosowaniu funkcji przynależności μ_P w postaci (3.13) lub podobnej jest nieznanosć oporów bocznicy o bardzo dużych oporach, które właśnie są przyczyną rozmycia struktury sieci wentylacyjnej. Nie można też zgodzić się z efektem stosowania wzoru (3.13) polegającym na tym, że bocznicom reprezentującym wyrobiska czynne wentylacyjnie przyporządkowuje się różne (choć i wysokie) wartości stopnia przynależności. Być może należałoby poszukiwać bardziej złożonej od (3.13) postaci funkcji przynależności, ze zmienną dyskretną, grupującą duże podzbiory bocznicy o zbliżonych wartościach oporów.

3.6. Schemat kanoniczny rozmyty z graficzną funkcją przynależności bocznic

Obecnie wydaje się wystarczające dla praktyki zastosowanie jakościowego podziału bocznic na klasy o odpowiadającym im umownym stopniu przynależności, kierując się funkcją, budową i rodzajem danego wyrobiska, otworu czy szczeliny jako drogi przepływu powietrza lub gazów. Praktyka inżynierska wskazała już na potrzebę rozróżniania bocznic zawartych na schematach wentylacyjnych. Bowiem dzieli się je czasem na dwie klasy:

- bocznice o zasadniczym znaczeniu dla całej sieci wentylacyjnej,
- bocznice pomocnicze, nie uczestniczące w realizacji głównego celu wentylacji kopalń.

Bocznice pomocnicze odwzorowują zwykle wyrobiska tamowane tamami oddzielającymi. Rysuje się je na schematach (przestrzennym lub kanonicznym) liniami cieńszymi w stosunku do bocznic zasadniczych, czasem także liniami przerywanymi. Również w literaturze spotyka się podobną interpretację wielu sytuacji wentylacyjnych, zwłaszcza w czasie trwania pożaru w kopalni.

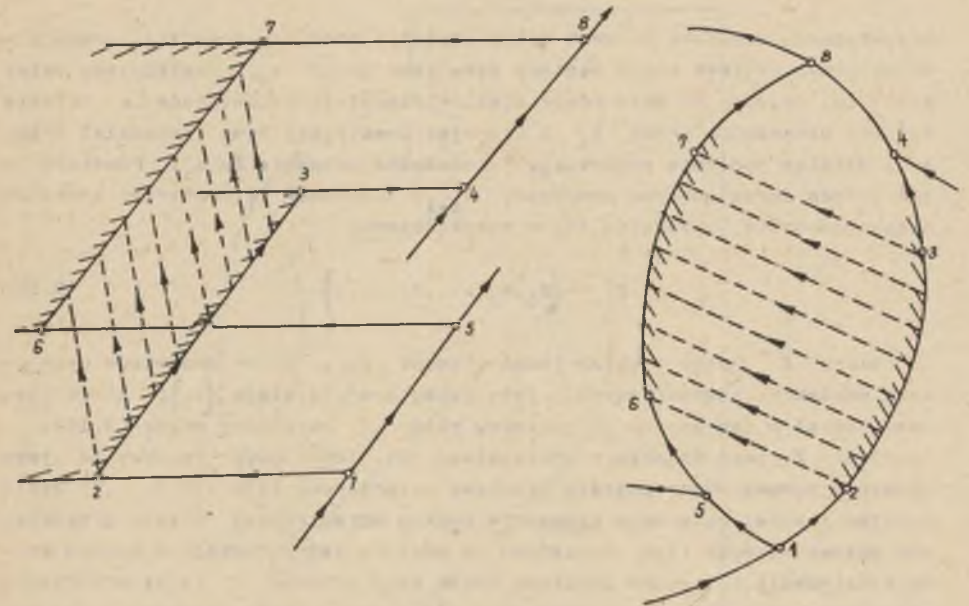
W monografii [97, s. 219], dla omówienia sytuacji wentylacyjnej po wybuchu metanu i pożarze w kopalni OR (Jugosławia), połączenia poprzez uszkodzone mosty wentylacyjne odwzorowane zostały liniami przerywanymi. Na rysunku [97, s. 248], zinterpretowano tak samo wyrobiska otamowane służą wentylacyjną. Przykłady podobnego kreślenia bocznic na schematach wentylacyjnych znajdziemy w wielu innych monografiach i artykułach, także zagranicznych. W warunkach istnienia zagrożenia metanowego ten sposób odwzorowania połączeń przez zroby i szczelinowaty górotwór, jak pokazał Walkiewicz [157], jest szczególnie dogodny dla analizy sytuacji wentylacyjnej. Podobne rozróżnienia bocznic stosował również Budryk [25].

Podane przykłady świadczą, że rozróżnienie znaczenia bocznic w tej formie wynikło z potrzeby rozmycia ostrej granicy odwzorowywanego zbioru wyrobisk górniczych. W pracy Walkiewicza dokonane rozmycie struktury sieci w istotny sposób ułatwia ocenę zagrożenia (rys. 3.3). Idąc dalej w tym kierunku, zdefiniujemy następującą funkcję przynależności μ_P w relacji rozmytej \tilde{P} :

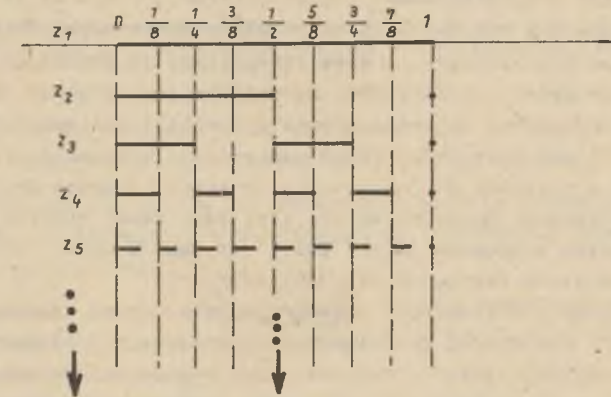
$$\mu_P : X \times U \times X \rightarrow \{z_1, z_2, \dots, z_1, \dots, z_\infty\} \quad (3.14)$$

Każdej bocznicy $u \in U$, takiej, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ lub $\langle y, u, x \rangle \in \tilde{P}$, przyporządkowuje ona znak $z_1 \in Z$ ze zbioru znaków:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_1, \dots, z_\infty\} \quad (3.15)$$



Rys. 3.3. Środowisko dwóch ścian zawałowych tworzących strukturę rozmytą sieci wentylacyjnej (według interpretacji W. Walkiewicza [157])



Rys. 3.4. Sposób konstrukcji zbioru nieskończonego znaków Z równolicznego zbiorowi liczb wymiernych dodatnich z przedziału [0,1]

Zbiór Z skonstruować można w następujący sposób (rys. 3.4). Weźmy odcinek [0,1] linii prostej i oznaczmy go przez z_1 . Podzielmy go następnie na dwie równe części i usuniemy przedział prawy. Tak przekształcony odcinek oznaczmy przez z_2 . Z kolei przedział nieusunięty dzielimy na dwie równe części i usuwamy prawy. Przedział usunięty w z_2 z powrot

przywracamy, dzielimy na dwie równe części i powstały przedział prawy znowu usuwamy. Odcinek w tej postaci oznaczymy przez z_3 . Postępujemy dalej podobnie, dzieląc na dwie równe części przedziały pozostające w obrazie odcinka oznaczonym przez z_1 i usuwając powstający nowy przedział prawy oraz dzieląc podobnie przedziały wprowadzone ponownie do z_1 . Powstały w ten sposób obraz odcinka oznaczamy z_{i+1} . Czynność tę powtarzać można do nieskończoności, uzyskując zbiór nieskończony:

$$Z' = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots\} \quad (3.15')$$

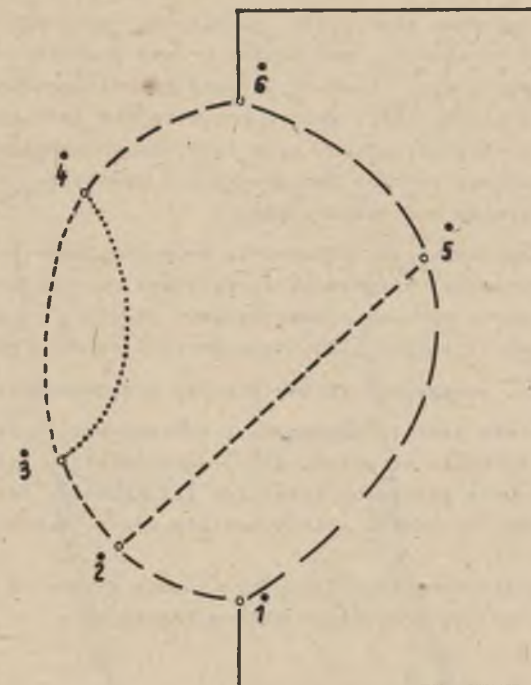
Do zbioru Z' dodamy jeszcze jeden element z_∞ , który odpowiada usuniętemu odcinkowi jednostkowemu i jest jakby granicą ciągu $\{z_i\}$. Skonstruowany został w ten sposób poszukiwany zbiór Z określony przez (3.15).

Zbiór Z jest zbiorem przeliczalnym [89, 125], gdyż wszystkie jego elementy ponumerowane zostały liczbami naturalnymi ($i = 1, 2, 3, \dots$). Jeśli przyjmując z kolei numerację elementów według wzrastającej liczby przedziałów pozostawionych (lub usuniętych) z odcinka jednostkowego w każdym kroku konstrukcji, to także uzyskamy zbiór przeliczalny z racji utworzenia ciągu nieskończonego liczb mnożonych przez dwa. Zbiór znaków (3.15) powstałych z podziału wybranego dowolnie odcinka jednostkowego może być więc traktowany jako pole funkcji przynależności, określanej przez (3.14). Gdyby chcieli przyporządkować jednak zbiorowi znaków (3.15) zbiór liczbowy, to mógłby być nim najwyżej zbiór liczb wymiernych. Zbiór liczb wymiernych jest też przeliczalny, a więc równoliczny ze zbiorem liczb naturalnych.

W ten sposób dowiedliśmy, że możliwe jest przedstawienie funkcji przynależności przez wartości stopni przynależności wyrażone graficznie, jeśli polem jej jest zbiór liczb wymiernych. Stanowi to ograniczenie teoretyczne w stosunku do funkcji μ_p , w której stopnie przynależności wyrażone są liczbami, gdyż polem dla niej jest zbiór nieprzeliczalny liczb rzeczywistych z odcinka $[0,1]$. Zbiór ten jest bowiem izomorficzny z całym zbiorem liczb rzeczywistych [89, 125].

Rysunek 3.5 ilustruje interpretację schematu kanonicznego rozmytego z rys. 3.2 dla stopni przynależności wyrażonych graficznie. Powstaje wtedy jednak ograniczenie techniczne, gdyż w praktycznym wykorzystaniu ze zbioru Z brać będzie można tylko kilka pierwszych elementów z_1, z_2, \dots, z_k oraz element ostatni z_∞ .

Można też obok częstości przerw przy rysowaniu linii zróżnicować także ich grubość. Wtedy zbiór skończony Z_k opisać można jako zbiór jednostkowych odcinków linii o zmniejszającej się grubości i wzrastającej liczbie przerw. Pierwszym znakiem będzie linia ciągła o dużej grubości, następnym linia ciągła cienka, a kolejnymi linie tworzone kreskami o coraz gęściejszych (krótszych) przerwach i coraz mniejszej grubości - aż do ostatniego znaku z_∞ wyrażającego brak przynależności.



Rys. 3.5. Interpretacja schematu kanonicznego rozmytego z rys. 3.2 wykorzystująca kod graficzny dla oznaczenia stopnia przynależności jego bocznic

Proponuje się więc następujące znaki na oznaczenie stopnia przynależności bocznic do odwzorowywanego schematu kanonicznego rozmytego:

- Znak z_1 - linia ciągła pogrubiona dla oznaczenia bocznic stanowiących wyrobiska z obiegowymi prądami powietrza, tamowanymi najwyższymi tamami regulacyjnymi.
- Znak z_2 - linia ciągła zwykła, dla oznaczenia bocznic stanowiących wyrobiska tamowane tamami oddzielającymi, z możliwością przejścia ludzi. Drzwi stanowiące przejście możliwe do otwarcia bez siłownika. Skład atmosfery odpowiadający przepisom.
- Znak z_3 - linia przerywana rzadko, dla oznaczania bocznic stanowiących wyrobiska tamowane tamami oddzielającymi pełnymi lub z przejściem, ale otwieranymi siłownikami, a także dukle izolowane urobkiem, zsypanie, otwory rurowe. Ilość powietrza mała, lecz zapewniająca minimalny z uwagi na NDS gazów skład dopuszczalny atmosfery.

Znak z_4 - linia przerywana gęsto, dla oznaczenia bocznic stanowiących wyrobiska zarabowane, podsadzone gruzem skalnym, zalane wodą na dużą wysokość, izolowane pełnymi tamami murowanymi lub kłocowymi, a także części zrobów przylegające jednostronnie do filarów nie rozgniecionych, same zroby ścian zawałowych. Bocznic te stanowią wyraźne drogi ucieczek powietrza, lecz skład atmosfery może być niekorzystny.

Znak z_5 - linia kropkowana, dla oznaczenia bocznic stanowiących szczeliny w górotworze, połączenia szczelinami poprzez zroby, wyrobiska izolowane korkami podsadzkowymi. Bocznic te mogą być drogami migracji małych ilości powietrza i różnych gazów.

Znak z_{∞} - brak linii wyrażający zerowy stopień przynależności.

Podział powyższy nie jest jednoznaczny i zawiera możliwości subiektywnej oceny przy odwzorowaniu struktury sieci wentylacyjnej jako grafu rozmytego. Stopień rozmycia struktury sieci lub jej części osiągnięty przy odwzorowywaniu zależy od zadania, jakie zostało sformułowane przed wykonawcą.

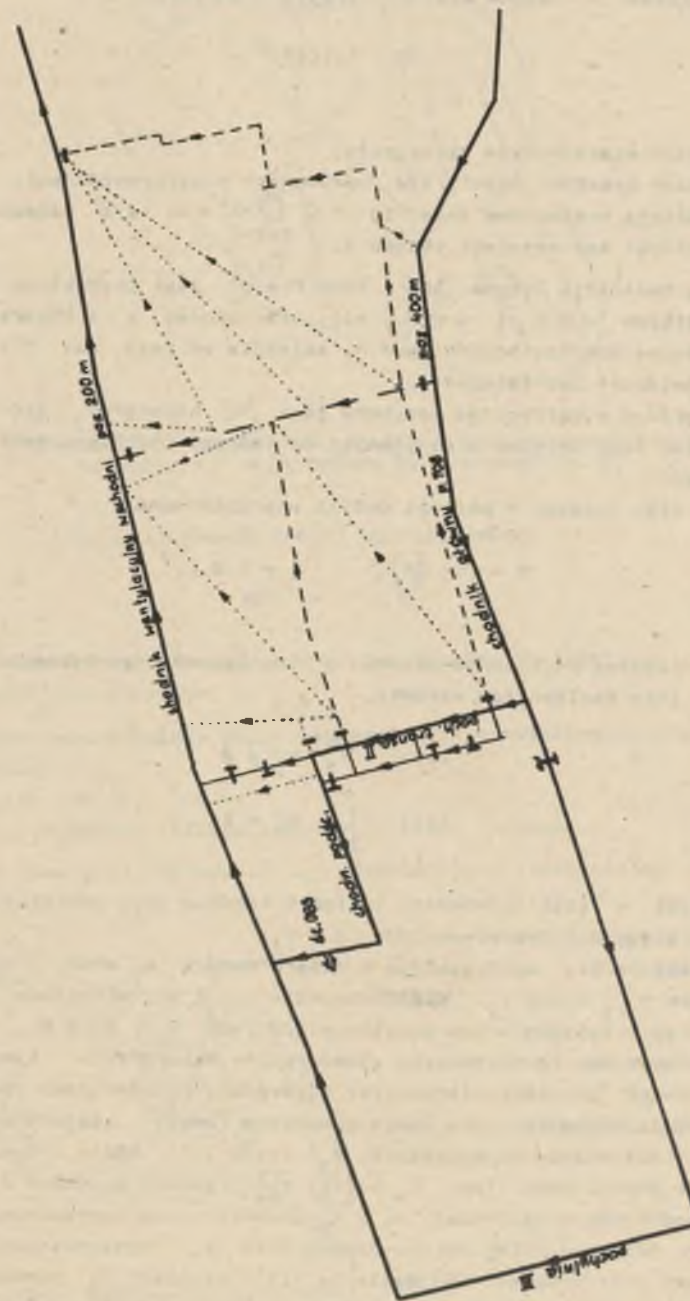
Na rys. 3.6 przedstawiono przykład odwzorowania struktury podsieci wentylacyjnej oddziału według powyższego zbioru znaków.

3.7. Hipergrafy i ich przekształcenie w graf liniowy

Przy odwzorowaniu sieci wentylacyjnej za pomocą schematów kanonicznych zwykłych lub rozmytych każda ich bocznic modeluje wyrobisko lub ciąg wyrobisk połączonych z sobą szeregowo. Krańce bocznic odwzorowują więc miejsca połączenia z sobą co najmniej trzech wyrobisk. Stąd w określeniu schematu wentylacyjnego jako reprezentacji geometrycznej grafu występowała relacja dwuczłonowa $R \subset X \times Y$ bądź trójczłonowa $P \subset X \times U \times X$. Oznaczało to, że jedna linia (bocznic, krawędź) nie łączyła więcej niż dwa wierzchołki.

W kopalni, obok wyrobisk łatwo odwzorowywanych linią łączącą dwa wierzchołki, występują elementy, których nie sposób tak odwzorować. Na przykład, są nimi pola pożarowe, zroby, kompleksy wyrobisk czasowo otamowanych, które łączą się w kilku, a nawet w kilkunastu miejscach, z innymi elementami sieci wentylacyjnej. Mogą być one modelowane za pomocą relacji n-członowych, a struktura sieci wentylacyjnej zawierającej takie elementy - za pomocą tzw. hipergrafów [17, 82, 166]. Hipergraf jest uogólnieniem grafu dla relacji wieloczłonowych.

Pierwsze wyniki w teorii hipergrafów uzyskali: Ray-Chaudhuri (1963), Erdős i Hajnal (1966) i Tomescu (1968) [wg 166]. Systematyczny wykład hipergrafów dał Berge (1970) [17], a także Zykow (1974) [166].



Rys. 3.6. Przykład odwzorowania struktury podsieci wentylacyjnej oddziału kopalni w postaci mapy wentylacyjnej rozmytej

Hipergrafem H nazywa się [82] trójkę uporządkowaną:

$$H = \langle X, U, P \rangle \quad (3.17)$$

gdzie:

- X - zbiór wierzchołków hipergrafu,
- U - zbiór krawędzi hipergrafu, nazywanych hiperkrawędziami,
- P - relacja n -członowa taka, że $P \subset \bigcup_{t=1}^n X^t \times U$, a X^t oznacza t -krotny produkt kartezjański zbioru X .

Według definicji Zykowa [166] $P \Leftrightarrow P(x, u)$ jest predykatem określonym dla wszystkich $x \in X$ i $u \in U$, stąd wierzchołek x i hiperkrawędź u są incydentne lub nieincydentne w H , zależnie od tego, czy $P(x, u)$ orzeka o tym prawdziwie lub fałszywie.

Hipergrafem symetrycznym nazywany jest [82] hipergraf, którego każdy wierzchołek musi należeć przynajmniej do jednego podzbioru tworzącego hiperkrawędź.

Można go więc zapisać w postaci dwójki uporządkowanej:

$$H = \langle X, \{E\} \rangle \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3.18)$$

gdzie:

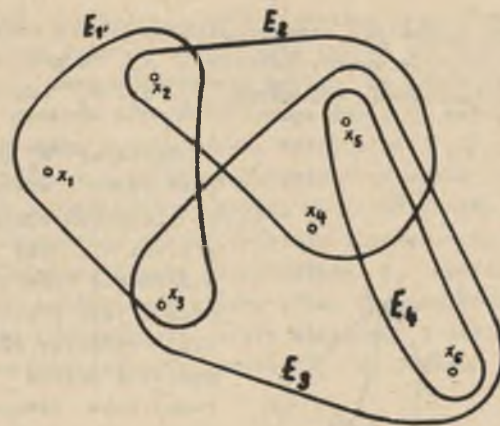
$\{E\}$ - rodzina podzbiorów zbioru X tworzących hiperkrawędzie spełniająca następujące warunki:

- (i) $\forall_j E_j \neq \emptyset$
- (ii) $\bigcup_{j=1}^{\infty} E_j = X$

Wierzchołek x jest incydentny z hiperkrawędzią u_j , określoną podzbiorem E_j , wtedy i tylko wtedy, gdy $x \in E_j$.

Wierzchołki x i y są przyległe w hiperkrawędzi u_j wtedy i tylko wtedy, gdy $\forall E_j x \in E_j \wedge y \in E_j$. Hiperkrawędzie u_j i u_k , określone podzbiorem E_j i E_k , są przyległe wtedy i tylko wtedy, gdy $E_j \cap E_k \neq \emptyset$.

Interesuje nas reprezentacja geometryczna hipergrafu symetrycznego. Przyjęto więc [17, 166] wierzchołki hipergrafu rysować jako punkty, hiperkrawędzie natomiast jako linie zamknięte (owale) obejmujące te wierzchołki, które należą do podzbioru E_j (rys. 3.7). Można również hiperkrawędzie dwuczłonowe (np. $E_4 = \{x_5, x_6\}$) rysować w formie linii łączącej bezpośrednio wierzchołki x_5 i x_6 . Geometryczną reprezentację hipergrafu H , nazywaną dalej wprost hipergrafem H , interpretować będziemy także jako graf blokowy $B(H)$ Bellerta [15]. Blokiem Γ_i nazwane zostało continuum 2-wymiarowe, lokalnie spójne, w którym wyróżnione są niektóre punkty brzegowe x_1, x_2, \dots, x_n .



Rys. 3.7. Przykład hipergrafu $H = \langle X, \{E\} \rangle$ zawierającego sześć wierzchołków x_1 oraz cztery hiperkrawędzie E_j

Graf $B(H)$ opisany za pomocą trójki uporządkowanej

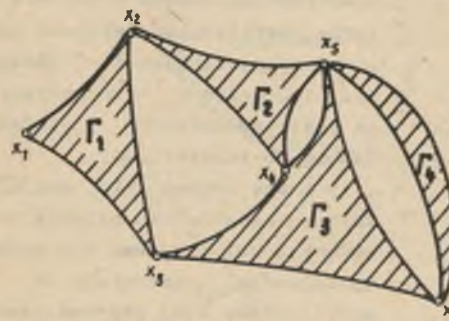
$$B(H) = \langle X, \Gamma, P \rangle \quad (3.19)$$

nazywany jest grafem blokowym lub grafem drugiej kategorii.

W określeniu tym przyjęto:

- X - zbiór wierzchołków grafu, stanowiących wyróżnione punkty brzegowe bloków Γ_i ,
- Γ - zbiór bloków,
- P - wielocłonowa relacja incydencji (tzw. incydentor).

Przykładowy graf blokowy $B(H)$ odpowiadający hipergrafowi H z rys. 3.7 przedstawiony jest na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Graf blokowy Bellerta $B(H)$ odpowiadający hipergrafowi H z rys. 3.7

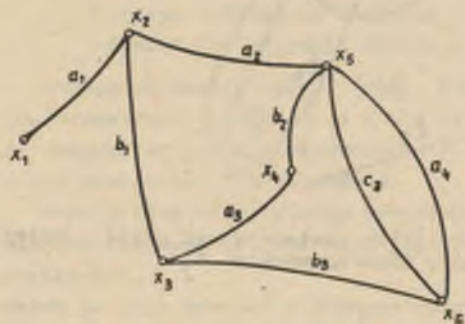
W grafie blokowym Bellerta [15] wyróżnia tak zwany szkielet. Szkieletem B_0 grafu blokowego B nazywany jest graf otrzymany w rezultacie zamiany każdego bloku Γ_i grafu B drzewem T_i , składającym się z krawędzi łączących wyróżnione punkty brzegowe bloku:

$$B_0 = \langle X, T, P \rangle \quad (3.20)$$

gdzie:

T - zbiór drzew T_i bloków grafu.

Wybór kształtu drzewa dla każdego bloku w grafie blokowym jest oczywiście dowolny. Ilustracją wyboru szkieletu B_0 w grafie $B(H)$ z rys. 3.8 jest rys. 3.9. Przykładowo, krawędzie a_3, b_3, c_3 tworzą drzewo T_3 bloku Γ_3 .

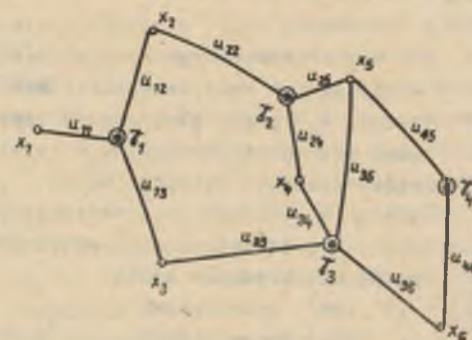


Rys. 3.9. Szkielet B_0 (jeden z wielu możliwych) grafu blokowego $B(H)$ z rys. 3.8 powstający po zastąpieniu bloków Γ_i drzewami $T_i = \{a_i, b_i, \dots, n_i\}$

kami δ_i a wierzchołkami x_1, x_2, \dots, x_k grafu blokowego. Właściwości tej relacji w niektórych specjalnych grafach badali Engl, Mlynski i Pernarde [48], nazywając jej elementy "pajakami" (spiders).

Szkielet B_0 grafu blokowego $B(H)$ jest jedną z wielu możliwych postaci liniowych odpowiadających hipergrafowi H . Duża liczba postaci odwzorowania hipergrafu jest przeszkodą w jego praktycznym wykorzystaniu. Poażujemy się zatem nieco innej postaci drzewa otrzymywanego w rezultacie zamiany bloku. Każdemu blokowi Γ_i przyporządkowany zostaje jeden dodatkowy wierzchołek δ_i poza brzegiem bloku, który następnie połączymy krawędziami $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ik}$ z wszystkimi wierzchołkami x_1, x_2, \dots, x_k stanowiącymi punkty brzegowe bloku Γ_i . Powstałe drzewo nazywać będziemy gwiazdą (graf gwiazdowy wg [46]) i jest ono geometryczną reprezentacją pewnej wielościennej relacji między wierzchołkami

Przykład zamiany bloków Γ_i w grafie blokowym z rys. 3.8 na gwiazdy z centrami δ_i obrazuje rys. 3.10. Otrzymany w wyniku powyższego przekształcenia graf liniowy nazywamy reprezentacją liniową $K(H)$ Königa dla hipergrafu H . Reprezentacja ta jest jednoznaczna z dokładnością do izomorfizmu.



Rys. 3.10. Szkielet $K(H)$ (jedyne możliwe) grafu blokowego $K(H)$ z rys. 3.8 powstający po zastąpieniu bloków Γ_i drzewami-gwiazdami $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}\}$ posiadającymi centra δ_i

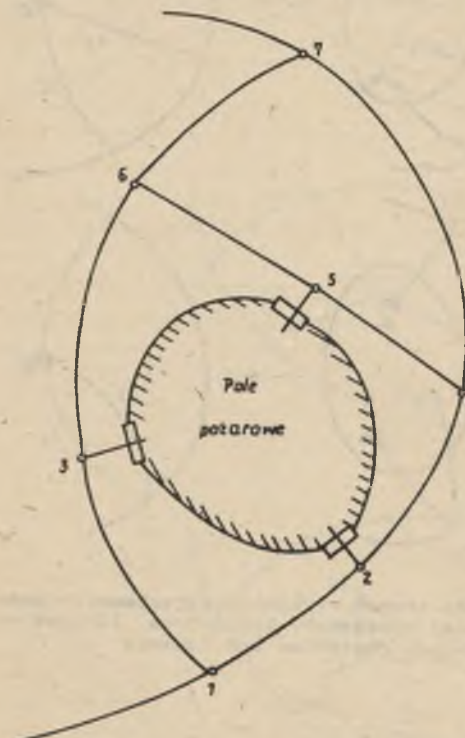
W pracy Zykowa [166] znaleźć można uzasadnienie, bliskie dowodowi topologicznemu dla przekształcenia hipergrafu H w graf liniowy $K(H)$ poprzez pewną formę grafu blokowego $B(H)$. Naszym zdaniem dowód topologiczny należałoby oprzeć na twierdzeniu

niem Brouwera [89] o istnieniu punktu stałego przy przekształceniach ciągłych n -wymiarowych sympleksów w siebie lub na ogólniejszej teorii retraktów Borsuka [23]. Borsuk udowodnił bowiem, że każde drzewo jest retraktem (czyli zbiorem punktów stałych) pewnego dysku D , czyli zbioru homeomorficznego z sympleksem 2-wymiarowym. Każdy blok Γ_i w grafie blokowym $B(H)$ jako homeomorficzny z sympleksem 2-wymiarowym można więc przekształcić w sposób ciągły w drzewo-gwiazdę mającą własność punktu stałego. Co więcej, retraktem będzie dowolne drzewo powstałe z połączenia wierzchołków x_i grafu blokowego z większą liczbą wierzchołków δ_i wyróżnionych wewnątrz bloków Γ_i i także połączonych między sobą. Prowadziłoby to nas jednak do niejednoznacznej reprezentacji grafu blokowego i dlatego dogodnie jest pozostać przy przekształceniu bloków Γ_i na gwiazdy o centrach δ_i .

3.8. Hiperschemat kanoniczny zwykły i rozmyty

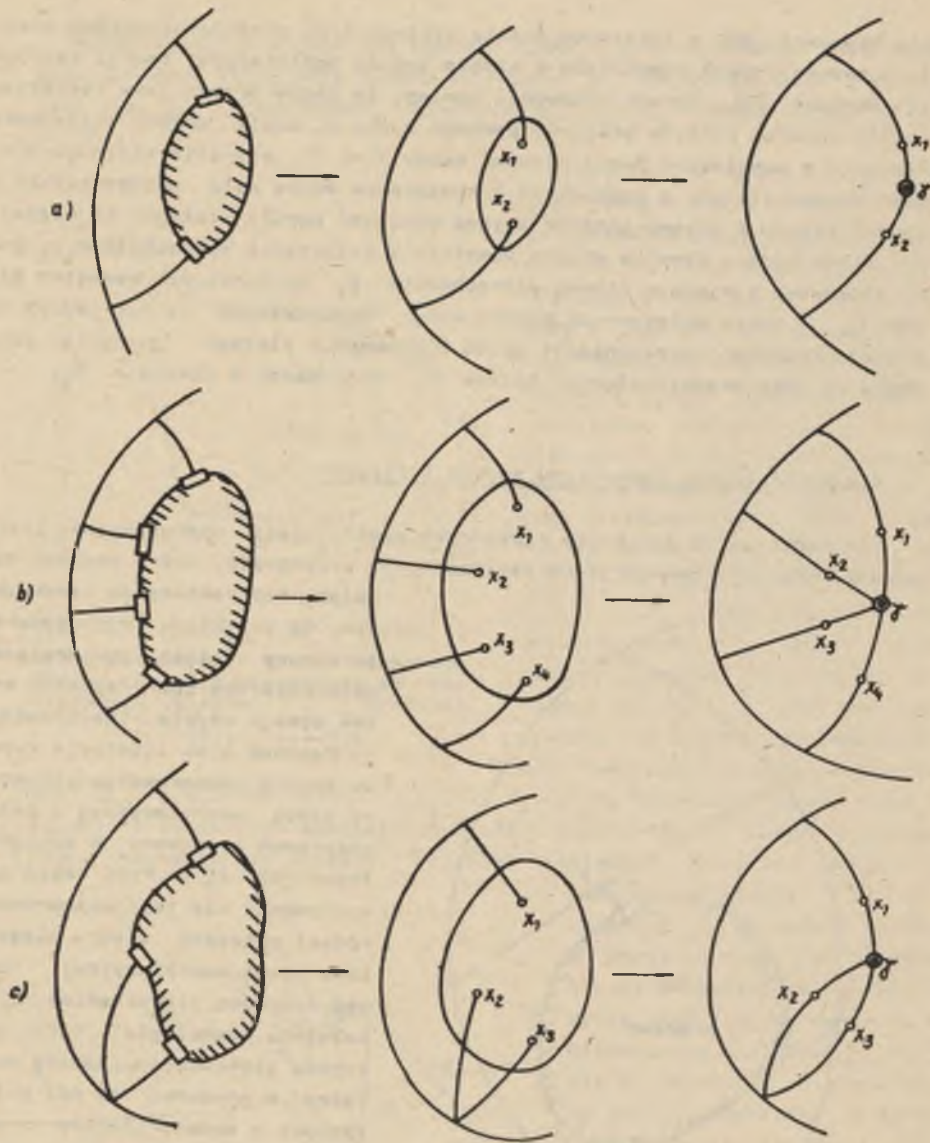
Dla modelowania struktury niektórych części sieci wentylacyjnej zastosowanie znajduje geometryczna reprezentacja hipergrafu, którą nazywać będziemy hiperschematem kanonicznym.

Na przykład odwzorowanie struktury sieci zawierającej pola pożarowe lub fragmenty zrobów wymaga użycia hiperkrawędzi.

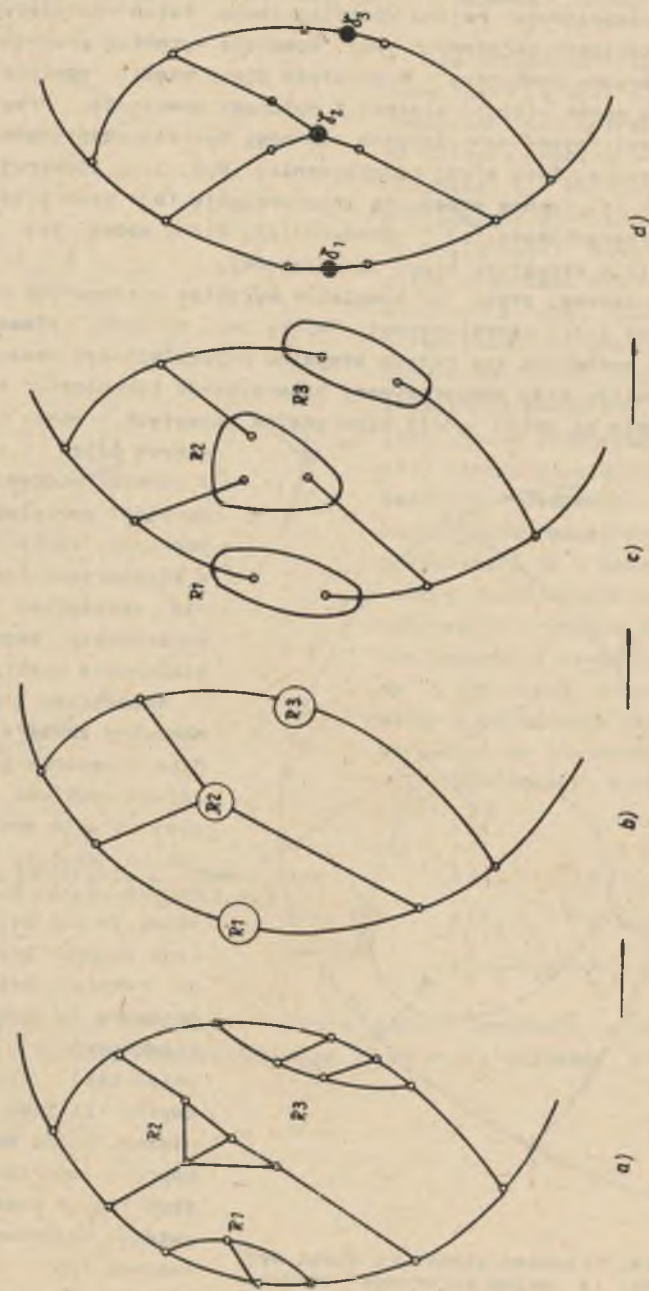


Rysunek 3.11 ilustruje typowy sposób odwzorowania struktury sieci wentylacyjnej z polem pożarowym stosowany w monografiach [97, 41]. Przy takim odwzorowaniu nie jest eksponowany rodzaj połączeń między elementami sieci wentylacyjnej. Czasem nadużywa się określeń "pole położone równolegle", "pole pożarowe stanowiące bocznice normalną" w stosunku do pól połączonych w sposób złożony z innymi elementami sieci wentylacyjnej. Przekształcenie hiperschematu kanonicznego, zawierającego pola pożarowe, w schemat kanoniczny liniowy umożliwia prawidłową analizę rodzaju połączeń w sieci wentylacyjnej (np. rys. 3.12).

Rys. 3.11. Przykład odwzorowania struktury fragmentu sieci wentylacyjnej z polem pożarowym według ogólnie przyjętego sposobu



Rys. 3.12. Ilustracja przekształcenia trzech różnych hiperschematów kanonicznych (zawierających pola pojarowe) w schematy kanoniczne liniowe wyrażające w sposób jednoznaczny charakter ich bocznic



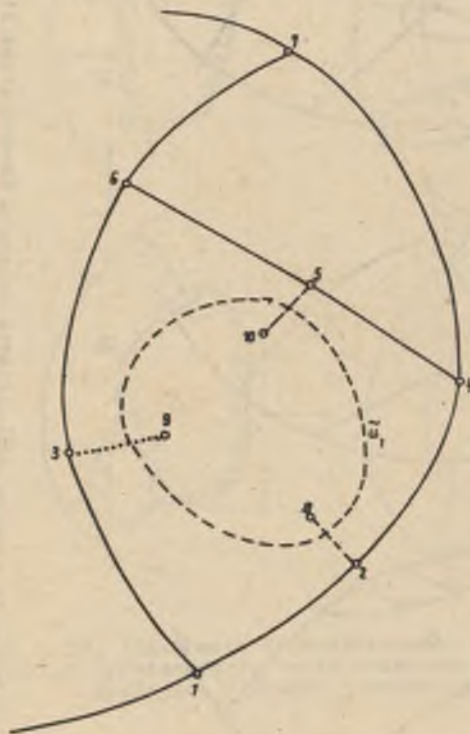
Rys. 3.13. Ilustracja sposobu uproszczenia schematu kanonicznego liniowego do hiperschematu i jego ponownego przekształcenia w schemat kanoniczny liniowy

Zastosowanie hiperschematu kanonicznego znajdujemy również przy odwzorowywaniu struktury sieci wentylacyjnej uproszczonej, na przykład na poziomie szczegółowości rejonu wentylacyjnego. Rejon wentylacyjny określony jest w przepisach górniczych jako "kompleks wyrobisk przewietrzanych niezależnym prądem powietrza". W praktyce dosyć często spotyka się rejon z dwoma (lub nawet więcej) wlotami i wylotami powietrza. Przy upraszczaniu takich sieci rejon wentylacyjny nie mogą być reprezentowane przez bocznice zastępczą, lecz przez hiperbocznice. Rys. 3.13 ilustruje na przykładzie sieci (a) typową stosowaną interpretację (b) oraz przejście do formalnego hiperschematu (c) i schematu (d), który można już wykorzystywać przy analizie struktury sieci uproszczonej.

Pola pożarowe, zroby lub kompleksy wyrobisk otamowanych nie przynależą wyraźnie do sieci wentylacyjnej. Tworzą one, z innymi elementami sieci, strukturę cechującą się różnym stopniem przynależności poszczególnych elementów. Należy więc odwzorowywany hiperschemat kanoniczny traktować jako rozmyty. Nie ma dotąd teorii hipergrafów rozmytych, wobec tego tworzenie

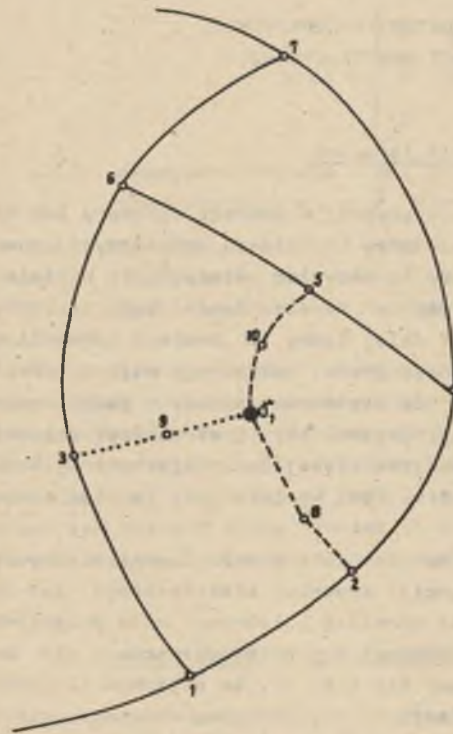
nowych pojęć i określić tylko z punktu widzenia zastosowań do sieci wentylacyjnej byłoby pochopne. Zinterpretujemy więc w kategoriach rozmytości jedynie szczególny przypadek hiperschematu mogącego mieć zastosowanie praktyczne.

Rozpatrzmy hiperschemat kanoniczny zawierający hiperbocznice połączone jedynie z boczniceami zwykłymi (reprezentującymi relacje dwuczłonowe), tak jak to widzimy w przykładach na rys. 3.11, 3.12 i 3.13. Założmy, że dla bocznicy są określone stopnie przynależności μ do rozpatrywanej struktury. Bocznice te zachowują się przy przekształceniu (jako jego niezmienniki) hiperschematu w zwykły liniowy schemat kanoniczny. Każda bocznica (x_i, x_j) poprzez wierzchołek x_j , należący też do przekształcanej na gwiazdę hiperbocznicy \tilde{u}_k , połączona jest z ekwiwalentną bocznice \tilde{u}_{kj} gwiazdy z centrum δ_k . Wierzchołek x_j tworzy pół-



Rys. 3.14. Przykład struktury sieci wentylacyjnej z polem pożarowym odwzorowanej w postaci hiperschematu rozmytego z graficzną funkcją przynależności hiperbocznicy

węzeł (węzeł stopnia drugiego) i, zgodnie z definicją, bocznice będzie dopiero połączenie wierzchołków x_i oraz δ_k . Stopień przynależności poprzedniej bocznicy (x_i, x_j) można więc przyporządkować nowej bocznicy (x_i, δ_k) .



Rys. 3.15. Reprezentacja liniowa hiperschematu rozmytego z rys. 3.14

Dla przykładu hiperschemat kanoniczny z rys. 3.11 (z polem pożarowym) potraktowano jako rozmyty (rys. 3.14). Hiperbocznicy \tilde{u}_1 można było przyporządkować graficznie stopień przynależności równy najwyższemu stopniowi przynależności bocznicy z nią połączonych. W reprezentacji graficznej owal hiperbocznicy \tilde{u}_1 , podobnie jak i bocznice pozostałe, rysowany jest według przyjętych wcześniej oznaczeń stopnia przynależności. Jednakże po przekształceniu rozpatrywanego hiperschematu H w schemat kanoniczny liniowy można już jednoznacznie przyporządkować nowym bocznicom utworzonej gwiazdy z centrum δ_1 stopnie przynależności bocznicy przyległych uprzednio do hiperbocznicy \tilde{u}_1 . Ilustruje to rys. 3.15, w którym:

$$\begin{aligned} \mu(x_2, x_8) &= \mu(x_8, \delta_1) \\ \mu(x_3, x_9) &= \mu(x_9, \delta_1) \\ \mu(x_5, x_{10}) &= \mu(x_{10}, \delta_1) \end{aligned}$$

Otrzymany hiperschemat kanoniczny rozmyty będzie postacią wygodną dla dalszej analizy sytuacji wentylacyjnej w obrębie istniejącego pola pożarowego.

4. ODWZOROWANIE STRUKTURY PRZEPŁYWOWEJ KOPALNIANEJ STECI WENTYLACYJNEJ

4.1. Sieć wentylacyjna jako pojęcie formalne

Odwzorowując strukturę sieci wentylacyjnej w postaci schematu lub hiperschematu kanonicznego kierujemy się przy kreśleniu dodatkowymi umowami, nie znanymi dla grafów. Wyróżniamy na przykład wierzchołki wejścia i wyjścia schematów, a krawędzie kreślimy w formie łuków bądź odcinków. Wprawdzie tak narysowany schemat jest dalej jedną z postaci izomorficznych reprezentacji geometrycznej pewnego grafu, pozostaje więc z formalnego punktu widzenia grafem, lecz wyraża się w nim związek z geometryczną reprezentacją tzw. sieci przepływowej. Chcemy, aby graf-schemat stanowił nie tylko model konfiguracji wyrobisk istniejącej lub projektowanej kopalni, lecz także model przepływu powietrza tymi wyrobiskami, a więc odwzorowywał strukturę przepływową.

W wielu sieciach fizycznych mamy do czynienia z przepływami między ich wierzchołkami różnych mediów, substancji, ładunku elektrycznego lub informacji. Rura, przewód lub wyrobisko górnicze, którymi może przepływać dana substancja, odwzorowane są krawędziami w grafie-schemacie, ale ponieważ przepływ w danej chwili odbywać się musi tylko w jednym kierunku, to krawędź wyrażająca zaistniałą relację antysymetryczną między wierzchołkami jest krawędzią zorientowaną. Zbiór wierzchołków (nazywać je dalej będziemy węzłami) X , zbiór krawędzi zorientowanych U i relacja trójczłonowa $\bar{P} \in X \times U \times X$ taka, że jeśli dla $x, y \in X$ i $u \in U$ oraz dla $x \neq y$ trójka $\langle x, u, y \rangle \in \bar{P}$, to trójka $\langle y, u, x \rangle$ nie należy do \bar{P} , nazywany jest [62, 82] grafem zorientowanym lub digrafem:

$$G = \langle X, U, \bar{P} \rangle \quad (4.1)$$

Digrafy mogą modelować nie tylko sieci przepływowe, lecz także ogólniejsze od nich sieci transportowe, w których między węzłami transportowane są wszelkie dobra, towary czy ludzie. Wynika stąd potrzeba przypisania ich krawędziom zorientowanym lub węzłom pewnych ilościowych charakterystyk wyrażających przepływ lub transport w sieci.

Formalnie przez sieć przepływową rozumiemy [82] trójkę uporządkowaną:

$$S = \langle G, \{a\}, \{h\} \rangle \quad (4.2)$$

gdzie:

G - digraf spójny bez pętli,

$a(x)$ - funkcja opisana na zbiorze węzłów $x \in X$, wyróżniająca dwa węzły nazywane biegunami: s - źródło oraz t - odpływ:

$$a(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla } x = s \\ 0 & \text{dla } x \neq s, t \\ -1 & \text{dla } x = t \end{cases}$$

$h(u)$ - nieujemna funkcja (tzw. obciążenie) na zbiorze krawędzi zorientowanych $\langle x, u, y \rangle \in \bar{P}$ dla $x, y \in X$ oraz $u \in U$.

Jeśli digrafem G będzie schemat kanoniczny złożony z prądów powietrza, to definicja (4.2) wyraża sieć wentylacyjną jako pojęcie formalne, o ściśle określonym zakresie znaczeniowym, a nie nazwę używaną w języku potocznym.

Nazwa "prąd powietrza" również użyta jest w znaczeniu formalnym - jako odpowiednik krawędzi zorientowanej u . Widzimy więc, że pojęcie sieci wentylacyjnej jest rozszerzeniem pojęcia schematu kanonicznego o pewne dodatkowe charakterystyki ilościowe bocznic i wierzchołków. Teoria sieci wentylacyjnej jest niejako nadbudową na teorii schematu kanonicznego. Odnieść ten wniosek można również do hiperschematów, wprowadzając podobnie formalne pojęcie hipersieci wentylacyjnej.

4.2. Funkcje przepływowa i potencjalna sieci

Podstawowa właściwość przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej polega na tym, że powietrze w niej podlega prawu zachowania masy. Masa powietrza wpływającego do węzła wejściowego bocznicy musi być równa masie powietrza odpływającego w węzle wyjściowym. Masa powietrza płynącego w bocznicie będzie nazywana wydatkiem prądu $f(u)$ lub $f(x, y)$, gdy para uporządkowana $\langle x, y \rangle$ określa jednoznacznie prąd u . Wydatek prądu stanowi wartość funkcji przepływowej, określonej jako przyporządkowanie pewnej liczby nieujemnej $f(x, y)$ każdemu prądowi $\langle x, y \rangle$.

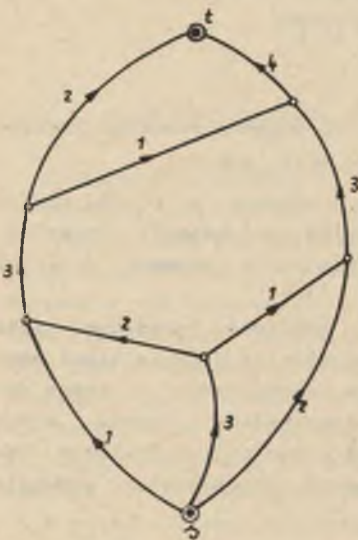
Tak więc przepływem w sieci S o wydatku v od węzła s do węzła t jest funkcja f , określona na zbiorze prądów i spełniająca następujące dwa warunki [50]:

$$1) \quad \forall x \in X \quad \sum_{y \in \Gamma(x)} f(x, y) - \sum_{z \in \Gamma^{-1}(x)} f(z, x) = a(x) \cdot v \quad (4.3)$$

$$2) \quad \forall \langle x, y \rangle \in U : 0 \leq f(x, y) \leq c(x, y) \quad (4.4)$$

Zbiór $\Gamma(x)$ jest zbiorem następników, a $\Gamma^{-1}(x)$ zbiorem poprzedników węzła x .

Warunek (4.3) mówi, że wydatek netto równy jest zeru dla każdego węzła, z wyjątkiem biegunów sieci. Wyraża on więc prawo zachowania, którego



Rys. 4.1. Przykład sieci wentylacyjnej $S = \langle G, \{s\}, \{t\} \rangle$ z wydatkami $f(u)$ jako obciążeniem prądów powietrza $\langle x, u, y \rangle$

szczególną postacią jest I prawo Kirchhoffa. Ilustracją spełnienia prawa zachowania jest sieć z rys. 4.1, dla której wydatek całkowity wynosi 6 przy zadanych wydatkach poszczególnych prądów. Liczba $c(x,y)$ w warunku (4.4) nazywana jest przepustowością bocznicy lub dla dowolnej sieci przepustowością (pojemnością) łuku sieci. Ford i Fulkerson ilustrowają przepustowość łuku $c(x,y)$ jako "maksymalną ilość pewnego towaru, który może być dostarczony z węzła x do węzła y w jednostce czasu" [50, s. 13]. Podobnie pisze Deo [46, s. 496]. Korzan [82] str. 222 interpretuje przepustowość łuku, będącego na przykład modelem rury wodociągowej jako "maksymalną, dopuszczalną ze względu na ciśnienie, intensywność przepływu wody". Określenia te nie wyjaśniają jednak, w jaki sposób wyznaczana jest maksymalna intensywność przepływu substancji lub towaru.

W zastosowaniach do sieci fizycznych przekroczenie przepustowości może być rozumiane jako "przesycenie" przewodu czy rurociągu grożące niebezpieczeństwem ich trwałości lub niebezpieczeństwem dla użytkowników, a

także powodujące straty ekonomiczne. Na przykład, dla wyrobisk górniczych przepustowość związać można byłoby z maksymalną dopuszczalną prędkością powietrza, nie powodującą intensywnego wzbijania pyłu i nie utrudniającą ruchów górnika oraz pracy maszyn i urządzeń. Przepisy górnicze określają dopuszczalne wartości prędkości powietrza dla wyrobisk z powyższych, między innymi, względów.

Obliczanie wartości przepustowości łuków sieci przepływowych związane jest więc z warunkami użytkowania przewodów modelowanych za pomocą łuków. Warunki użytkowania mogą być nawet takie, że nie narzucają ograniczenia przepustowości jako warunku istotnego dla sieci. Na przykład, Steenbrink [132] w swej pracy nad optymalizacją sieci transportowych (głównie dróg kołowych i kolejowych) pomija warunek (4.4), wprowadzając całkiem inny w jego miejsce. Zadanie równowagi w sieci transportowej Steenbrink sprowadza (za innymi autorami) do równowagi między popytem na transport a jego podażą. Po stronie podaży występują między innymi zależności techniczne

składające się z ograniczeń sieci. Sugerujemy więc w tym miejscu, że w konkretnie analizowanej sieci transportowej może być różnorodna interpretacja przepustowości łuku.

W kopalnianej sieci wentylacyjnej, aby osiągnąć jakikolwiek wydatek $f(u)$, w bocznicie wentylacyjnej u należy dysponować różnicą potencjałów $\pi(u)$. Różnica potencjałów $\pi(u)$ jest [10, 16] traktowana formalnie jako funkcja określana dla wszystkich prądów $u \in U$, jeśli dla dowolnego cyklu $C = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ spełnia warunek:

$$\sum_{u \in U^+} \pi(u) - \sum_{u \in U^-} \pi(u) = 0 \quad (4.5)$$

gdzie:

U^+ - zbiór prądów cyklu zorientowanych zgodnie z kierunkiem jego obchodzenia,

U^- - zbiór prądów zorientowanych przeciwnie.

Z funkcją $\pi(u)$ związana jest funkcja potencjalna sieci przyporządkowująca każdemu węzłowi $x \in X$ wartość $p(x)$ określoną z zależności:

$$\pi(u) = \pi(x,y) = p(x) - p(y) \quad (4.6)$$

W interpretacji fizycznej funkcji $\pi(u)$ odpowiada ilość pracy koniecznej dla pokonania oporów przepływu jednostkowego wydatku $f(u)$ między końcami x,y bocznicy $u = \langle x,y \rangle$.

Każdej bocznicie $u \in U$, tworzącej wraz z innymi strukturę sieci wentylacyjnej, przyporządkowana jest także funkcja $T(u)$ nazywana temperatem bocznicy, spełniająca zależność zwaną tutaj prawem Guibala-Devilleza:

$$T(u) = \frac{f(u)}{\sqrt{\pi(u)}} \quad (4.7)$$

Przyjmijmy więc, że przepustowość $c(u)$ bocznicy u jest maksymalnym możliwym wydatkiem $f(u)$ odpowiadającym istniejącej różnicy potencjałów $\pi(u)$. Będzie więc:

$$c(u) \equiv f(u) = T(u) \sqrt{\pi(u)} \quad (4.8)$$

Warunek (4.8) oznacza, że bocznicie sieci wentylacyjnej będą nasyczone. Pomiędzy wszystkimi parami węzłów sieci wentylacyjnej zrealizowany jest przepływ maksymalny, a w szczególności między biegunami s, t . Za Fordem i Fulkersonem [50] sieć taką nazywać będziemy siecią z maksymalnymi przepływami wielokierunkowymi. W sieci wentylacyjnej mają więc mniejsze znaczenie problemy poszukiwania maksymalnego przepływu.

4.3. Odwzorowanie sieci wentylacyjnej w postaci sieci wielobiegunowej

Sieć przepływowa, w szczególności sieć wentylacyjna, nie musi być zdefiniowana jako dwubiegunowa. Niech k oraz l tworzą odpowiednie klasy biegunów wejściowych (źródłowych) i wyjściowych (odpływowych).

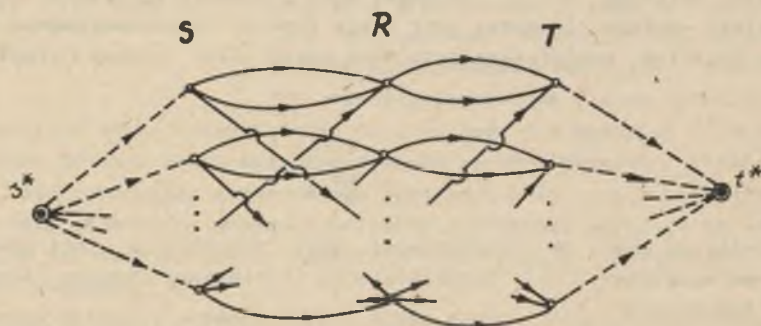
Sieć z $k + l$ biegunami nazywana jest wielobiegunową lub dokładniej (k,l) -biegunową [155]. Prawo zachowania dla sieci (k,l) -biegunowej jest podobne jak dla sieci $(1,1)$ -biegunowej (4.3). Dla wykazania tego stwierdzenia podzielimy węzły X sieci na trzy zbiory:

- S - zbiór źródeł
- T - zbiór odpływów
- R - zbiór węzłów pośrednich

Przepływ z S do T o wydatku v nazywana [50] jest funkcja f określona na zbiorze prądów U , która spełnia warunki:

$$\begin{aligned} f(x,X) - f(X,x) &= 0 & \text{dla } x \in R \\ f(S,X) - f(X,S) &= v & \text{dla } x \in S \\ f(T,X) - f(X,T) &= -v & \text{dla } x \in T \end{aligned} \quad (4.9)$$

Sieć (k,l) -biegunową można rozszerzyć do sieci $(1,1)$ -biegunowej dołączając dwa węzły: super-źródło s^* i super-odpływ t^* oraz wszystkie prądy postaci (s^*,S) , (T,t^*) , charakteryzujące się dowolnymi przepustowościami. Rys. 4.2. ilustruje powyższy sposób rozszerzania sieci.



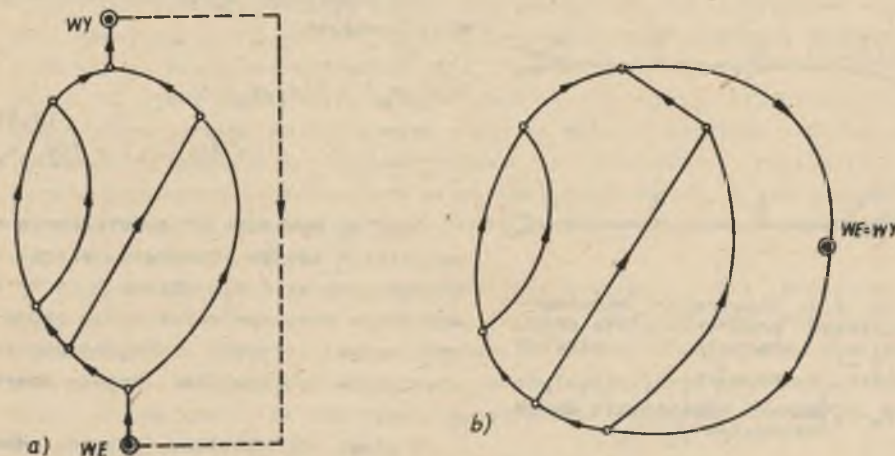
Rys. 4.2. Ilustracja sposobu rozszerzania sieci (k,l) -biegunowej do sieci $(1,1)$ -biegunowej poprzez dołączenie super-źródła s^* i super-odpływu t^*

Sieci wentylacyjne kopalń są sieciami (k,l) -biegunowymi. Decyduje o tym występowanie większej niż para liczby szybów kopalnianych. Dla celów obliczeniowych stosuje się jednak rozszerzanie odwzorowywanych sieci (k,l) -biegunowych do postaci zawierającej dwa bieguny. Operacja ta jest powszechnie znana. Nie analizowano jednakże dotąd operacji odwrotnej: two-

żenia sieci wielobiegunowej z sieci dwubiegunowej. Mogą przy tym wystąpić (oprócz trywialnego zwężenia sieci uprzednio rozszerzonej) dwa przypadki:

- 1^o - gdy następuje rozszczepienie biegunów s, t na subbieguny s^1, t^1 zgodnie z przylegającymi do nich prądami biegunowymi,
- 2^o - gdy następuje utworzenie nowych biegunów s'_1, t'_1 na skutek przecięcia sieci.

Przypadek pierwszy nie jest interesujący dla sieci wentylacyjnych, gdyż w sieciach dwubiegunowych (odwzorowywanych dla kopalń dwuszybowych) prądy biegunowe są pojedyncze. Rozpatrzmy więc tylko przypadek drugi. W tym celu sieć wentylacyjną S_0 z wydatkami przyporządkowanymi prądom traktujemy jako graf ważony. Wagę prądu jest jego wydatek $f(u)$ brany zawsze ze znakiem dodatnim, natomiast wagę sieci lub jej części definiuje się jako sumę wag wszystkich prądów składowych.



Rys. 4.3. Ilustracja dwóch sposobów zamknięcia sieci wentylacyjnej a) za pomocą dodatkowego prądu, b) przez bezpośrednie zlepianie biegunów

Rozpatrywaną sieć wentylacyjną S_0 traktować będziemy też jako zamkniętą w sensie Budryka [25], to znaczy z dodatkowym prądem łączącym obydwie bieguny (wejście, wyjście) lub z bezpośrednim zlepianiem biegunów (rys. 4.3a,b). Podobnie jak w teorii grafów [16, 37, 46, 82] interesująca jest w sieci znajomość dendrytu o największej wadze, czyli dendrytu maksymalnego.

Kruskal i Prim [16, 37, 46, 50, 82] znaleźli proste algorytmy konstruowania dendrytów maksymalnych w grafach. Wykorzystują one twierdzenie [50], że na to, aby dendryt grafu był maksymalny, potrzeba i wystarcza, żeby każda krawędź spoza dendrytu (tzn. cięciwa) spełniała pewną nierówność.

mającą (już w interpretacji dla prądów sieci wentylacyjnej) następującą postać:

$$f(x_1, x_k) < \min [f(x_1, x_2), f(x_2, x_3), \dots, f(x_{k-1}, x_k)] \quad (4.10)$$

gdzie:

- $\langle x_1, x_k \rangle$ - prąd nie należący do dendrytu, tzw. cięciwa,
- $\langle x_1, x_2 \rangle, \dots, \langle x_{k-1}, x_k \rangle$ - droga złożona z prądów dendrytu,
- $f(x_1, x_j) = f(x_j, x_1)$ - wydatek prądu $\langle x_1, x_j \rangle$, brany jako liczba dodatnia.

Każdą cięciwę $\langle x_1, x_k \rangle$ można przekształcić homeomorficznie w drogę z trzema prądami poprzez wstawienie dwóch półwęzłów (węzłów stopnia drugiego) y_1 i y_k (rys. 4.4).

Dla otrzymanej drogi zachodzi oczywisty związek:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_k) &= f(x_1, y_1) = \\ &= f(y_1, y_k) = f(y_k, x_k) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Czyniąc powyższe przekształcenie dla wszystkich cięciw dendrytu sieci S_0 otrzymujemy sieć S_1 . Sieci S_0 i S_1 są wzajemnie homeomorficzne, gdyż jedną z nich można otrzymać z drugiej poprzez utworzenie lub scalenie prądów szeregowych.

Rys. 4.4. Ilustracja homeomorficznego przekształcenia prądu $\langle x_1, x_k \rangle$ stanowiącego cięciwę sieci, w drogę $\langle x_1, y_1 \rangle, \langle y_1, y_k \rangle, \langle y_k, x_k \rangle$ dzięki wyróżnieniu dwóch półwęzłów y_1, y_k

W sieci S_1 wybieramy ponownie dendryt maksymalny, na który składały się będą wszystkie prądy tworzące poddendryt izomorficzny wybranemu uprzednio dendrytowi w sieci S_0 (i równej wagi) oraz po dwa prądy z każdej drogi utworzonej po przekształceniu cięciw dendrytu S_0 . Zgodnie z warunkiem (4.11) dodatkowymi prądami tworzącymi dendryt maksymalny mogą być dowolne dwa prądy należące do drogi $\langle x_1, y_1 \rangle, \langle y_1, y_k \rangle, \langle y_k, x_k \rangle$: wybierzemy więc prądy przylegające do węzłów x_1 oraz x_k . W ten sposób cięciwy dendrytu tworzone są przez prądy $\langle y_1, y_k \rangle$. Możemy więc dla nich napisać warunek:

$$f(y_1, y_k) < \min [f(y_1, x_1), f(x_1, x_2), \dots, f(x_{k-1}, x_k), f(x_k, y_k)] \quad (4.12)$$

Jednakże wobec istnienia związków (4.11) stwierdzamy, że po prawej stronie nierówności (4.12) występują co najmniej dwa wydatki równe warto-

ści występującej po lewej stronie. Tak więc nierówność (4.12) jest w istocie równością:

$$f(y_1, y_k) = \min [f(y_1, x_1), f(x_1, x_2), \dots, f(x_{k-1}, x_k), f(x_k, y_k)] \quad (4.13)$$

Węzły y_1 w sieci S_1 , traktować będziemy jako bieguny s'_1, t'_1 dwóch sieci wielobiegunowych S_1^D oraz S_1^{AD} posiadających różną strukturę.

4.4. Równoważność przepływowa sieci wentylacyjnych o przekształconej strukturze

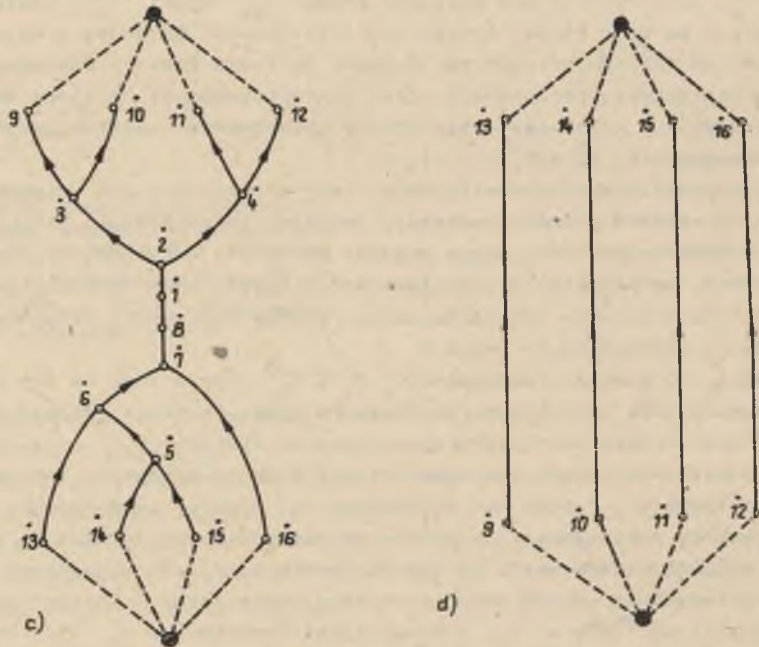
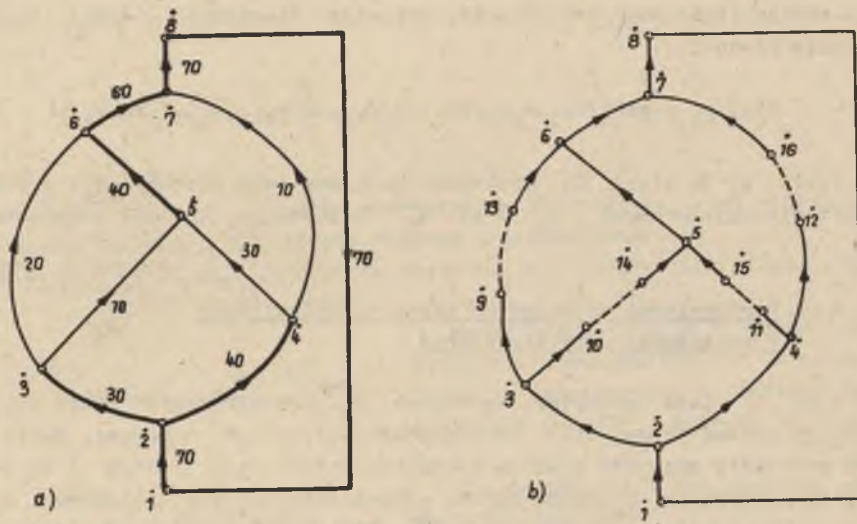
Sieć S_1^D jest dendrytem, natomiast S_1^{AD} antydendrytem sieci S_1 . Bieguny wejściowe jednej sieci są biegunami wyjściowymi drugiej. Jeśli jednak pominięty zostanie problem kierunków prądów, to zgodnie z warunkiem (4.11) wydatek ich pomiędzy parami odpowiadających sobie biegunów s'_1, t'_1 jest równy sobie w sieciach S_1^D i S_1^{AD} . Ponieważ jest wzajemna jednoznaczność między biegunami obydwóch sieci, również suma wydatków źródeł s'_1 sieci S_1^D jest równa sumie wydatków źródeł t'_1 sieci S_1^{AD} . Wydatki obydwóch sieci są więc równe, a więc sieci te nazywać będziemy sieciami równoważnymi ze względu na wydatek. Wykazać to także można posługując się metodą rozszerzenia otrzymanych sieci wielobiegunowych do sieci dwubiegunowych. Rys. 4.5 i 4.6 ilustrują sposób uzyskiwania sieci wielobiegunowych równoważnych S_1^D i S_1^{AD} .

Odmianą omawianego przekształcenia jest tworzenie sieci niespójnej w postaci dwóch dendrytów - komponent, jednego składającego się z prądów powietrza świeżego i drugiego z prądami powietrza zużytego. W niektórych przypadkach, na przykład dla projektowania optymalnych przekrojów wyrobisk, nie ma znaczenia oddzielne rozpatrywanie komponent. Struktury takie stosował W. Żytka [167].

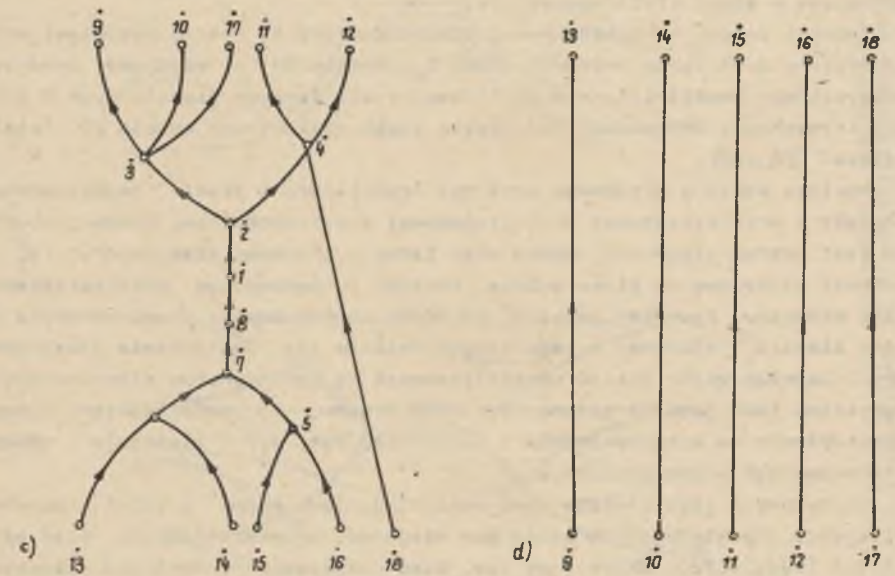
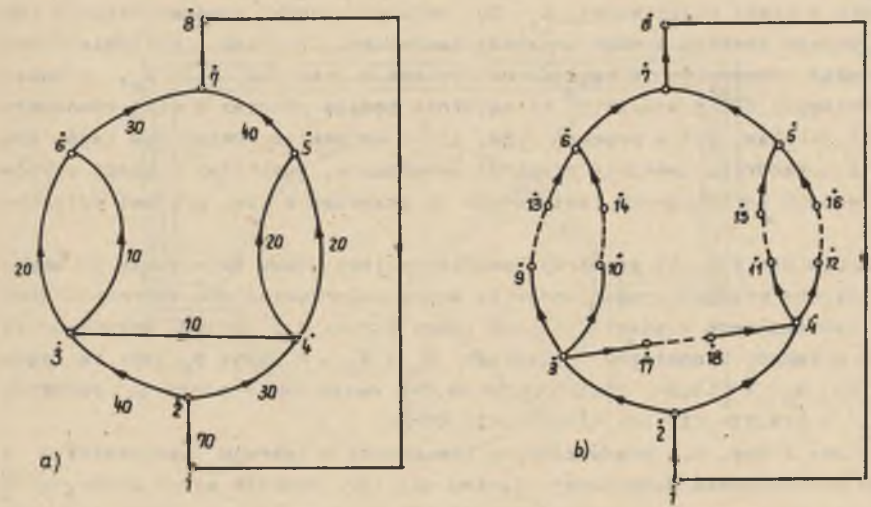
Wykazaliśmy powyżej równoważność S_1^D i S_1^{AD} ze względu na ich wydatek, przy czym obydwie są sieciami wielobiegunowymi. Powstaje pytanie czy sieci S_0 i S_1^D są również równoważne ze względu na wydatek?

Dla udzielenia odpowiedzi wykorzystamy pojęcie przekroju zorientowanego rozdzielającego źródło s od odpływu t w sieci przepływowej [16, 37, 46]. Przekrój zorientowany określony ze względu na węzły s i t indukuje pewien podział węzłów sieci na dwa wzajemnie rozłączne podzbiory X_1 i X_2 takie, że przekrój składa się z tych wszystkich prądów, których jeden węzeł (początkowy) jest w X_1 , a drugi węzeł (końcowy) w X_2 . Spełniony musi być warunek, aby $s \in X_1, t \in X_2$.

Pojęcie przekroju rozdzielającego jest bliskie pojęciu przekroju kanonicznego Barczyka [13], który rozumiał go jako linię zamkniętą, obejmującą wylot sieci i rozcinającą prądy na dwa podzbiory. Przyjmijmy więc dalej nazwę wprowadzoną przez Barczyka. Wydatek każdego przekroju kanonicz-



Rys. 4.5. Przykład przekształcania sieci dwubiegunowej S_0 bez cykli wewnętrznych na równoważne między sobą sieci wielobiegunowe: (c) sieć-dendryt S_1^D , (d) sieć-anty-dendryt S_1^{AD} , rozszerzonych następnie do sieci dwubiegunowych



Rys. 4.6. Przykład przekształcania sieci dwubiegunowej S_0 zawierającej cykl wewnętrzny $\{2,3,4\}$ na równoważne między sobą sieci wielobiegunowe: (c) sieć-dendryt S_1^D , (d) sieć-anty-dendryt S_1^{AD}

nego przez sieć równy jest wydatkowi sieci. Jeśli więc zbiór prądów antydendrytu w sieci początkowej S_0 lub przekształconej homeomorficznie sieci S_1 będzie tworzył w nich przekrój kanoniczny, to sieć wielobiegunowa S_1^{AD} będzie równoważna ze względu na wydatek z sieciami S_1 i S_0 , a wobec równoważności S_1^{AD} z siecią S_1^D ta ostatnia będzie również z nimi równoważna. Jak wykazano już w pracach [134, 137], warunkiem koniecznym tego, aby prądy antydendrytu tworzyły przekrój kanoniczny, jest brak w sieci cykli wewnętrznych (związanych na przykład z tzw. prądami zależnymi).

Okazuje się też, że przekrój kanoniczny jest wtedy największy (ze względu na liczbę prądów) i właściwość tę można wykorzystać dla tworzenia dendrytu maksymalnego w sieci [137]. W sieci z rys. 4.5 prądy antydendrytu tworzą przekrój kanoniczny w sieciach S_0 i S_1 . W sieci S_0 jest to podzbiór $(X_1, X_2) = \{ \langle 3,6 \rangle, \langle 3,5 \rangle, \langle 4,5 \rangle, \langle 4,7 \rangle \}$, natomiast w sieci S_1 podzbiór $(X_1, X_2) = \{ \langle 9,13 \rangle, \langle 10,14 \rangle, \langle 11,15 \rangle, \langle 12,16 \rangle \}$.

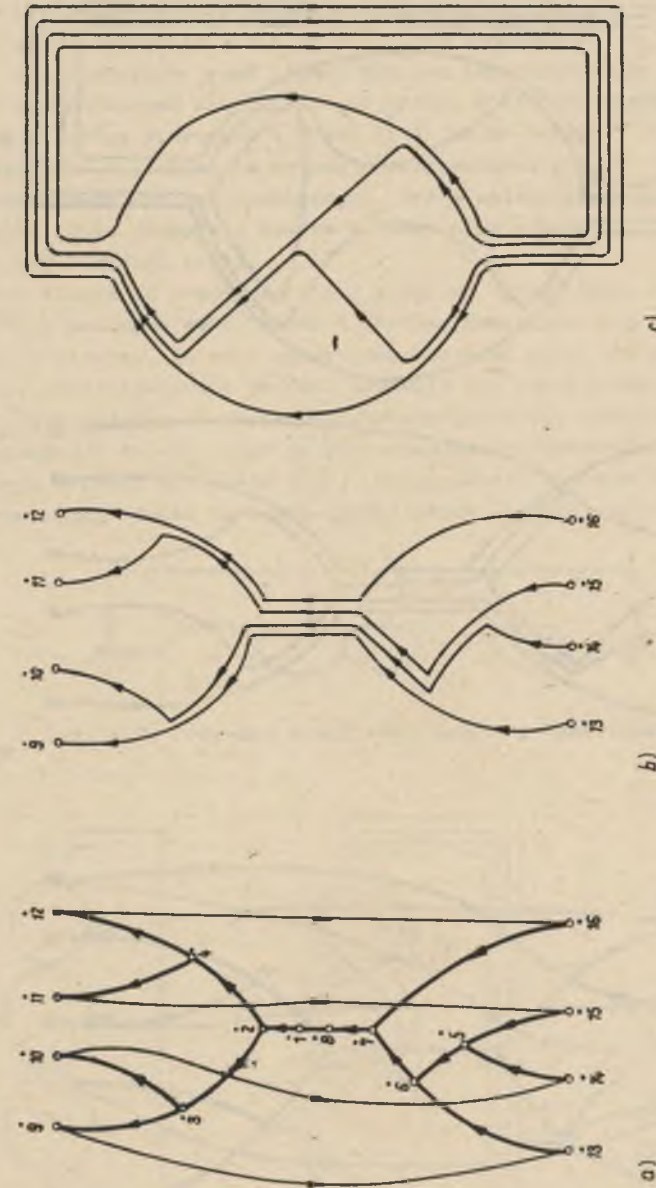
W sieci z rys. 4.6 prądy-cięciwy nie tworzą przekroju kanonicznego z powodu występowania dodatkowej cięciwy $\langle 17,18 \rangle$. Wydatek sieci-dendrytu S_1^D jest więc powiększony o wydatek źródła 18 (odpływu 17) i podobnie jest dla sieci S_1^{AD} .

Zatem początkowa sieć dwubiegunowa S_0 oraz jej dendryt przekształcony do sieci wielobiegunowej nie są równoważne ze względu na wydatek, jeśli występują w sieci cykle wewnętrzne.

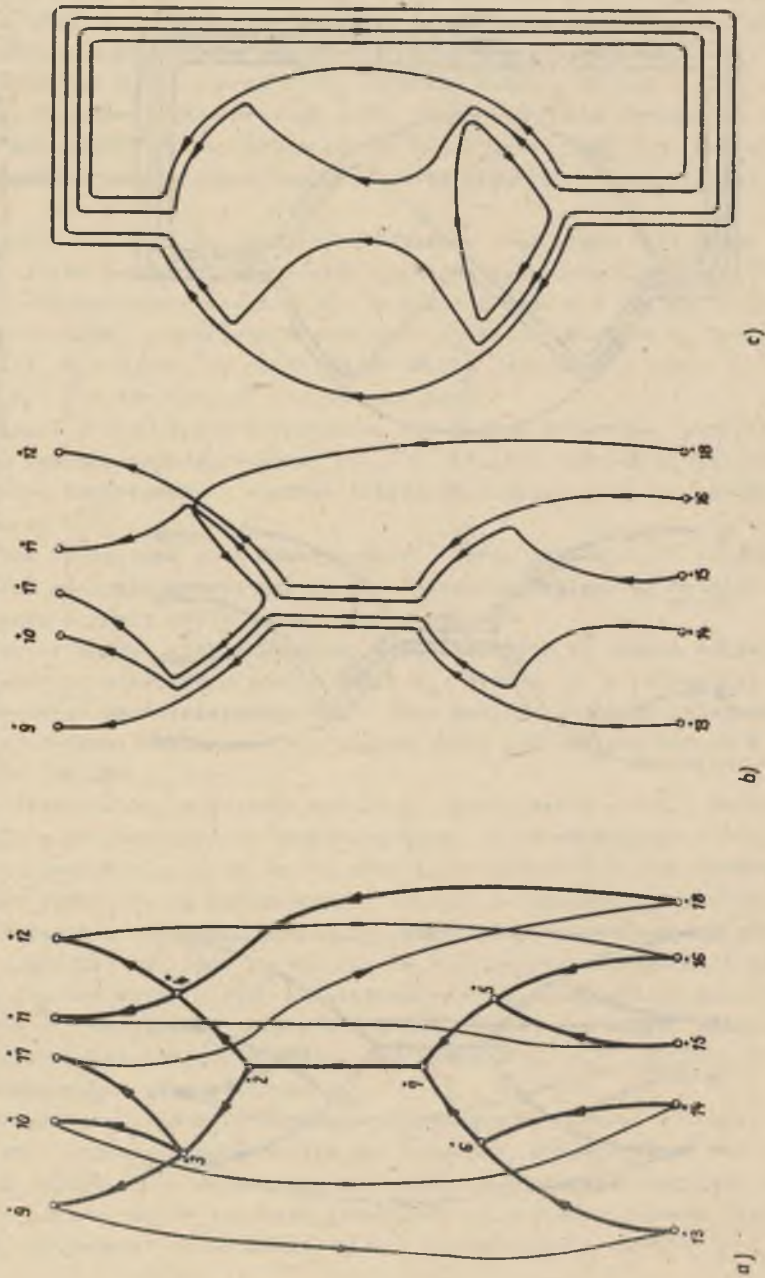
Wydatki źródeł wielobiegunowej sieci-dendrytu S_1^D tworzą natomiast zbiór identyczny z wektorem prądowym sieci S_0 . Wynika to z własności dendrytu maksymalnego umożliwiającego wybór bazy cykli liniowo niezależnych w pewnej przestrzeni wektorowej nad ciałem liczb całkowitych modulo 2 (ciało Galois) [16, 46].

Analiza wektora prądowego może być trudniejsza w sieci dwubiegunowej aniżeli w przekształconej wielobiegunowej sieci-dendrycie. Każdy graf-drewno jest grafem planarnym, można więc łatwo odwzorować sieć-dendryt S_1^D w schemat ilościowy na płaszczyźnie. Korzyść proponowanego przekształcenia jest widoczna. Zauważmy jeszcze, że wobec równoważności sieci-dendrytu S_1^D oraz sieci S_1^{AD} złożonej z jego cięciw możliwe jest zastąpienie sieci-dendrytu poprzez zbiór cięciw ukształtowanych na podobieństwo sieci-dendrytu. Konieczna jest jedynie zmiana kierunków prądów, to znaczy zamiana biegunów-odpływów na bieguny-źródła i odwrotnie. Rys. 4.7 ilustruje sposób proponowanego przekształcenia.

Otrzymaną w jego efekcie sieć wielobiegunową można z kolei, poprzez sklejanie odpowiadających sobie par biegunów, przekształcić w sieć zamkniętą (rys. 4.7c). Uzyskujemy tzw. sieć rozszczepioną Aprilego. Rozszczepienie bocznic znane już było Szwyrkowowi i Protodiakonowowi [117], natomiast zastosowali je do całej sieci wentylacyjnej Aprile [7] i Sciorta [123].



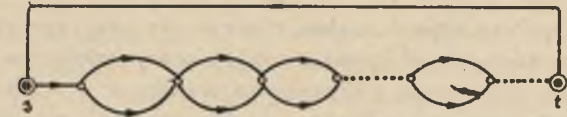
Rys. 4.7. Ilustracja sposobu zastąpienia sieci-dendrytu ((a) linie pobrube) przez zbiór cięciw ((b) linie cienkie) ukształtowanych na podobieństwo sieci-dendrytu ((b) i przekształcenia go w sieć zamkniętą ((c) poprzez sklejanie odpowiadających sobie par biegunów



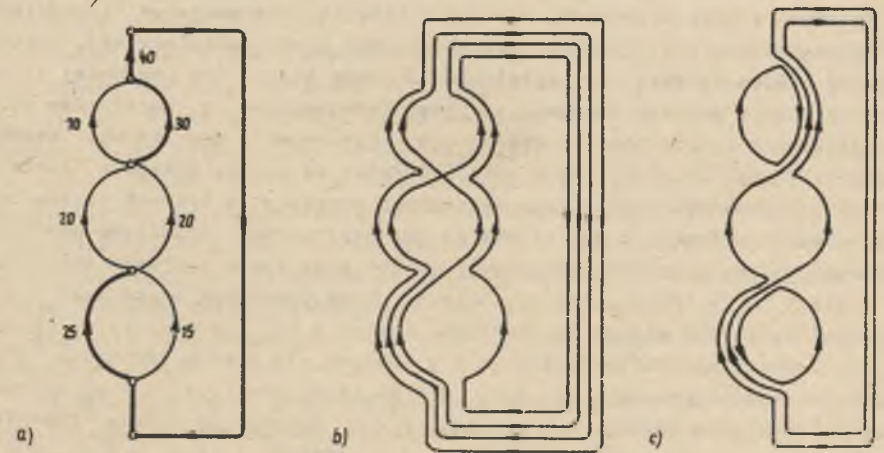
Rys. 4.8. Ilustracja sposobu przekształcenia sieci-dendrytu (a) w sieć rozszczerzoną Aprilego (c) dla przypadku sieci z cyklem wewnętrznym

Bystron w pracy [32] analizuje trudności w konstruowaniu modeli rozszczerzonych sieci, które wiążą się z istnieniem cykli wewnętrznych, natomiast w pracy [31] podaje sposób rozszczerzenia bocznic w warunkach tworzenia się zamkniętego oczka wewnętrznego źródłowego (np. z depresją cieplną). Nie rozwiązany jest jednak problem rozszczerzania cykli wewnętrznych bezźródłowych nie tworzących oczka, w których prądy nie są zorientowane w jednym kierunku. W pracy [137] autor wyraził pogląd, że warunkiem koniecznym stosowania metody rozszczerzania prądów jest brak w sieci wewnętrznych cykli niezależnych, które należałyby do bazy podstawowej. Cykle takie pozostają bowiem w sieci mimo wykonania maksymalnego przekroju kanonicznego sieci.

Rys. 4.8 ilustruje przypadek sieci z cyklem wewnętrznym. Przekształcając ją według podanych wyżej zasad i tworząc zamkniętą sieć prądów rozszczerzonych widzimy, że cykl wewnętrzny pozostać musi wewnątrz sieci. W jego części (dla niektórych prądów) uzyskuje się zwrot przeciwny do zwrotu pozostałych składowych rozszczerzonego prądu (rys. 4.8c). Tylko tę formę rozszczerzania należy uznać za teoretycznie uzasadnioną i zgodną z ideą zawartą w pracy Bystronia [31]. Posługiwanie się sposobem rozszczerzania prowadzącym tylko do cykli zewnętrznych niesie na przykład osłabienie



Rys. 4.9. Przykład sieci wentylacyjnej "pacifier"



Rys. 4.10. Przykład rozszczerzenia sieci "pacifier" wyłącznie na cykle zewnętrzne (b) oraz z ujawnieniem dwóch cykli wewnętrznych (c)

bienie zbieżności metod obliczeniowych rozplywu powietrza w stosunku do metod bez rozszczepienia [137]. Szczególnie duże trudności rozszczepienia występują dla sieci "paciorkowej" (rys. 4.9), w której trudno jest wybrać prądy podlegające wielokrotnemu rozszczepieniu. Jeśli bowiem w sieci jest φ prądów niezależnych (mających stanowić samodzielne cykle po rozszczepieniu), to wszystkich możliwych cykli zewnętrznych jest $2^{\varphi-1}$. Rys. 4.10 ilustruje na przykładzie małej sieci "paciorkowej" sposób rozszczepienia tylko na cykle zewnętrzne (rys. 10b) oraz sposób zgodnie z wyborem dendrytu powodującym ujawnienie się cykli wewnętrznych (rys. 4.10c).

4.5. Przekształcanie struktury topologicznej w strukturę przepływową

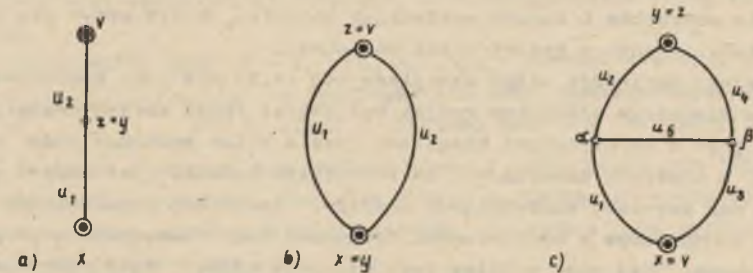
Struktura topologiczna sieci wentylacyjnej odwzorowywana jest za pomocą schematu kanonicznego, będącego geometryczną reprezentacją jakiegoś grafu. Według teorii grafów siecią nazywany jest obciążony digraf z wyróżnionymi wierzchołkami-biegunami, a więc samą strukturę przepływową stanowi digraf z biegunami. W odniesieniu do sieci wentylacyjnej geometryczną reprezentacją jej struktury przepływowej jest schemat kanoniczny złożony z prądów powietrza.

Nie zawsze jednak odwzorowujemy rzeczywistą sieć wentylacyjną w postaci schematu, w którym występowałyby tylko prądy powietrza. Przyczyną jest często niepełna informacja o przepływie powietrza w danym wyrobisku (bocznicy), nie pozwalająca na przykład ustalić kierunku przepływu.

Dla sieci wentylacyjnych projektowanych, mimo znajomości ich struktury topologicznej, informacja o przepływach powietrza jest jeszcze bardziej ograniczona, gdyż sprowadza się do znajomości niektórych przepływów o narzuconych z góry wydatkach. Dlatego niezwykle interesującym zagadnieniem jest orientowalność struktury topologicznej sieci wentylacyjnej. Postawić można bowiem pytanie, czy ustalenie biegunów sieci (co najmniej jednego źródła s i jednego odpływu t) jest jednoznaczne z ustaleniem węzłów wejściowych (początków) i wyjściowych (końców) dla każdej bocznicy sieci? Mówiąc inaczej, czy w odwzorowywanej za pomocą schematu kanonicznego sieci wentylacyjnej mogą występować bocznicę, w których trzeba byłoby ustalać orientację dla uzyskania jednoznaczności przepływu powietrza, a więc takie, w których należałoby wybrać przepływ w kierunku dozwolonym?

Niech $u_1 = (x, z)$ oraz $u_2 = (y, v)$ będą dowolnymi bocznicami nie mającymi wspólnych elementów. Łańcuch $t(x, v) = \{x, (x, z), z = y, (y, v), v\}$ otrzymany poprzez sklejanie węzłów z i y nazywa się siecią szeregową $S = u_1 \circ u_2$ z biegunami x i v . Cykl $C = \{x, (x, z), z = v, (y, v), y = x\}$ otrzymany przez sklejanie węzłów x i y oraz z i v nazywa się siecią równoległą $S = u_1 \vee u_2$ z biegunami $x=y$ oraz $z=v$. Niech $t_1(x, y) = \{x, u_1, \alpha, u_2, y\}$ oraz $t_2(v, z) = \{v, u_3, \beta, u_4, z\}$ będą dowolnymi łańcuchami długości $l=2$ nie mającymi wspólnych elementów. Schemat uzyskany przez sklejanie węz-

łów x i v oraz y i z , a także przez połączenie krawędzią u_5 węzłów α i β nazywa się siecią przekątną z biegunami $x = v$ oraz $y = z$. Ilustrację zdefiniowanych sieci elementarnych stanowi rys. 4.11.



Rys. 4.11. Sieci elementarne

a) sieć szeregową, b) sieć równoległą, c) sieć przekątną

Jeśli w sieci szeregowej węzeł x stanowi biegun-źródło, a węzeł v biegun-odpływ, to węzeł x jest połączony z węzłem v łańcuchem $t(x, v)$ przechodzącym w jednym kierunku przez obydwie bocznicę sieci. Łańcuch $t(x, v)$ równoznaczny jest z drogą $D(x, v)$ składającą się z prądów u_1 . Jeśli w sieci równoległej węzeł x stanowi biegun-źródło, a węzeł z biegun-odpływ, to z węzła x do węzła z przechodzą w jednym kierunku przez bocznicę u_1 lub u_2 dwa (trywialne) łańcuchy $t_1 = \{x, u_1, z\}$, $t_2 = \{x, u_2, z\}$ równoznaczne z dwoma drogami $D_1 = \{x, u_1, z\}$ i $D_2 = \{x, u_2, z\}$. Widać więc, że w sieci szeregowej i równoległej wyróżnienie źródła i odpływu w sposób jednoznaczny wyróżnia krańce bocznic. Nie ma więc potrzeby przyjmowania w tych sieciach orientacji krawędzi; jest ona automatycznie zadana przez ustalenie rodzaju biegunów.

Inaczej jest w sieci przekątnej. Między biegunami x i y istnieją między innymi dwa takie łańcuchy $t_1 = \{x, u_1, \alpha, u_5, \beta, u_4, z\}$ oraz $t_2 = \{x, u_3, \beta, u_5, \alpha, u_2, y\}$, które przechodzą przez bocznicę u_5 w różnych kierunkach. Natomiast tylko jeden z tych łańcuchów będzie stanowił drogę $D(x, y)$ i aby ją wybrać, należy ustalić orientację bocznicę u_5 , zwanej w teorii sieci wentylacyjnej bocznicą przekątną. Widać więc, że w sieci przekątnej wyróżnienie źródła i odpływu nie wyróżnia w sposób jednoznaczny krańców wszystkich bocznic. Ustalenie orientacji bocznicę przekątnej, czyli określenie kierunku prądu przekątnego, jest więc konieczne.

Powstaje natychmiast pytanie, czy wnioski powyższe odnieść można do dowolnych sieci?

Za Wietuchnowskim [155] określimy w sposób indukcyjny sieć szeregowo-równoległą, zwaną inaczej siecią normalną. Twierdzimy więc, że jeśli sieć jednobocznicowa jest siecią normalną oraz sieci S_1 i S_2 są sieciami normalnymi, to $S_1 \circ S_2$ i $S_1 \vee S_2$ są także sieciami normalnymi. Warun-

kciem koniecznym i wystarczającym dla normalności sieci S jest przechodzenie wszystkich łańcuchów w jednym kierunku przez dowolną boczną sieć, co oznacza, że każdy łańcuch jest równocześnie drogą od źródła s do odpływu t [137, 155]. Wyróżnienie biegunów sieci jest wystarczające dla wyróżnienia początków i końców wszystkich bocznic, a tym samym dla ustalenia kierunku prądów w każdej sieci normalnej.

W formalnej definicji sieci wentylacyjnej (4.2) nie jest konieczne żądanie, aby pierwszym elementem trójki był digraf (graf zorientowany), lecz wystarczy graf z wyróżnionymi biegunami, jeśli tylko prowadzi do sieci normalnej. W praktyce oznacza to, że orientacja bocznic jest zadana automatycznie bez potrzeby szczegółowej analizy. Struktura topologiczna dana schematem kanonicznym z wyróżnionymi biegunami jest równocześnie strukturą przepływową. Stąd więc możliwe jest używanie nazwy "sieć niezorientowana" dla sieci reprezentowanej obciążonym schematem kanonicznym normalnym z wyróżnionymi biegunami.

Wniosek powyższych nie można odnieść do sieci zawierających jakąkolwiek podsieć izomorficzną z siecią elementarną przekątną. Podsieć T sieci S nazywany jest tutaj podgraf (podschemat kanoniczny), który posiada dokładnie dwa węzły graniczne p i q z pozostałą częścią sieci S, nazywane biegunami podsieci T [77, 137]. Węzeł x dowolnego podgrafu T sieci S nazywa się zaś granicznym, jeśli jest biegunem sieci S lub stanowi węzeł styczności [77] podgrafu T oraz SNT. Analizując strukturę dowolnych sieci łatwo możemy znaleźć przykład sieci nie zawierającej podsieci przekątnej, która jednak łączy poszczególne podsieci w sposób przekątny.

Związki między tzw. sieciami globalnymi a ich składowymi podsieciami elementarnymi badano już w pracy [137]. Szerokie rozpracowanie podobnego problemu w dowolnych sieciach dwubiegunowych przedstawił Wietuchnowskij [155], dlatego wykorzystamy tutaj wprowadzone przez niego operacje superpozycji i zwiżania podsieci jako operacje uzasadnione matematycznie. Problem tzw. rozkładu kanonicznego sieci jest dlatego interesujący z punktu widzenia teorii sieci przepływowych, że umożliwia dokonanie podziału sieci na klasy według kryteriów strukturalnych.

Niech więc S i T będą sieciami dwubiegunowymi nie mającymi wspólnych elementów. Jeden z prądów $u = \langle x, y \rangle$ sieci S zamieniamy w sieć T złączając węzły x, y odpowiednio z biegunami s, t sieci T i odłączając prąd u. Otrzymujemy sieć $S_u(T)$, a przeprowadzoną operację nazwiemy za [155] superpozycją sieci zewnętrznej S i wewnętrznej sieci T. Operację odwrotną polegającą na zastąpieniu podsieci T sieci S przez jeden prąd $u = \langle x, y \rangle$ nazywać będziemy zwiżaniem podsieci T w prąd u.

Uogólniając te operacje, można rozpatrywać je w odniesieniu do wielu prądów u_1, u_2, \dots, u_k danej sieci.

Niech więc sieć $s = u_1 \circ u_2 \circ \dots \circ u_n$ stanowi n-krotną sieć szeregową, a T_1, T_2, \dots, T_n będą dowolnymi sieciami dwubiegunowymi. Superpozycje

czy $s_{u_1, u_2, \dots, u_n} (T_1, T_2, \dots, T_n)$ będziemy nazywać s-siecią. Aby sieć dowolna S była s-siecią, musi mieć co najmniej dwie podsieci zastępowalne przez dwa prądy połączone szeregowo. Wystarczy więc w tym celu istnienie w niej węzła rozdzielającego, którego usunięcie czyni sieć S nie-spójną.

Z kolei niech sieć $r = u_1 \vee u_2 \vee \dots \vee u_n$ stanowi n-krotną sieć równoległą, a T_1, T_2, \dots, T_n są dowolnymi sieciami dwubiegunowymi. Superpozycje $r_{u_1, u_2, \dots, u_n} (T_1, T_2, \dots, T_n)$ nazywać będziemy r-siecią. Tak więc sieć S jest r-siecią, gdy zawiera chociaż jedną różną od niej podsieć z identycznymi biegunami. Sieć nie będąca s-siecią lub r-siecią nazywana będzie p-siecią, przy czym przynależność do jednego typu wyklucza przynależność do innych typów sieci [155].

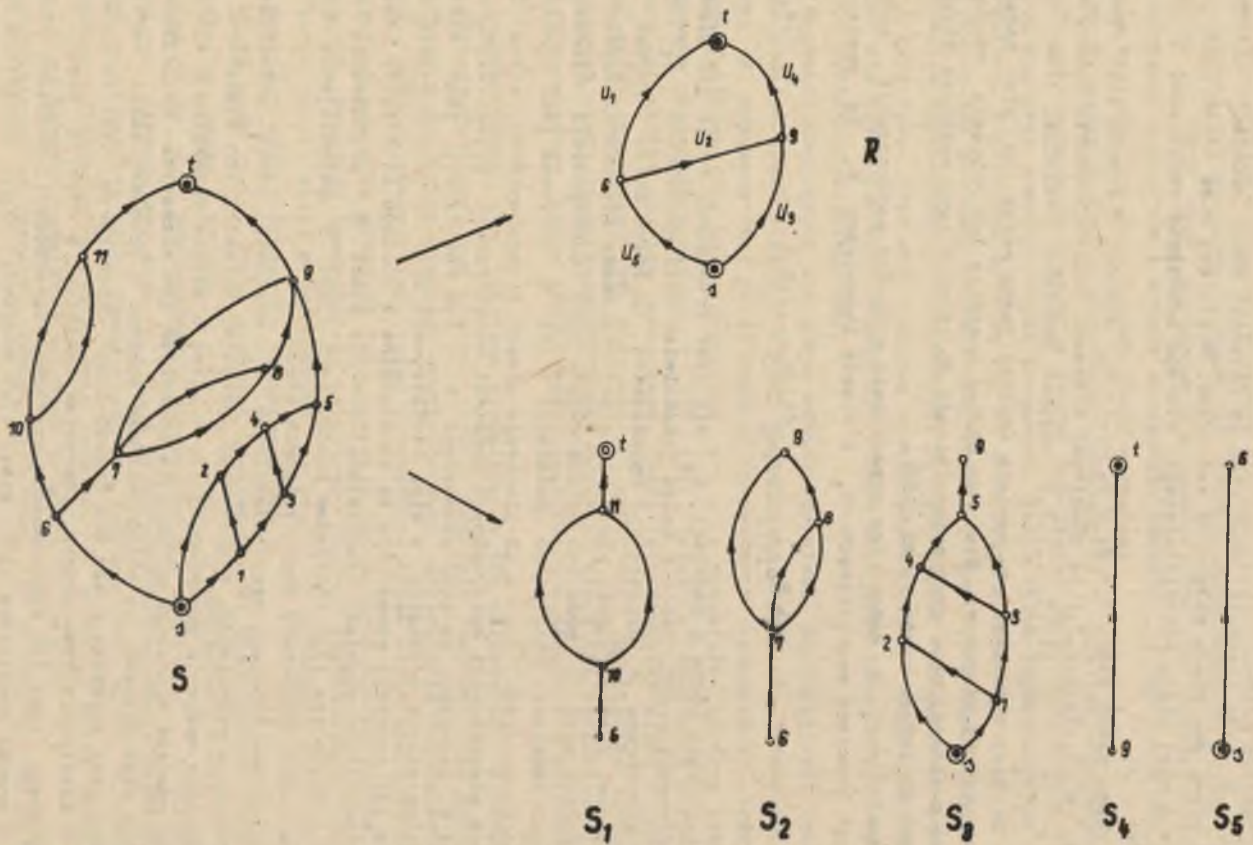
Dowolną sieć S można więc przedstawić w formie superpozycji maksymalnych podsieci wewnętrznych S_1 z siecią zewnętrzną R, co zapiszemy

$$S = R_{u_1, u_2, \dots, u_n} (S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (4.14)$$

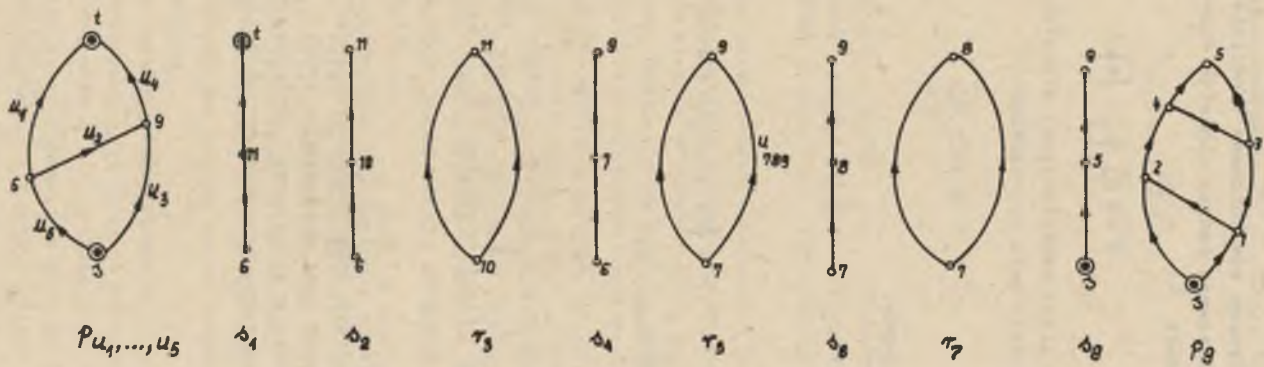
jeśli chociaż jedna z podsieci S_1 nie jest trywialna, czyli nie stanowi pojedynczego prądu. Jeśli z kolei jakąkolwiek sieć wewnętrzną S_1 oraz sieć zewnętrzną R okazuje się rozkładalna, to znowu można poddać ją rozkładowi dopóty, dopóki wszystkie sieci nie okażą się nierozkładalne. W ten sposób sieć S może być przedstawiona jako superpozycja nierozkładalnych podsieci. Ostateczne rozłożenie sieci S nazywane jest rozkładem kanonicznym [155]. Rys. 4.12 ilustruje sposób przedstawienia sieci S w formie superpozycji maksymalnych podsieci wewnętrznych S_1, S_2, \dots, S_5 oraz sieci R. Zauważmy, że sieć zewnętrzną R w tym rozkładzie jest nierozkładalną siecią przekątną, a więc rozpatrywana sieć S jest p-siecią. Niektóre jej podsieci wewnętrzne są rozkładalne i dlatego ostateczny zestaw nietrywialnych podsieci nierozkładalnych dla sieci S przedstawia rys. 4.13. Zestaw ten jest rozkładem kanonicznym sieci S pozwalającym dopiero na ocenę charakteru poszczególnych prądów.

Większość podsieci nierozkładalnych S_1 stanowią sieci elementarne: szeregową i równoległą, stąd wynika charakter normalny ich elementów.

Dopiero operacja superpozycji tych sieci z siecią przekątną (w tym przypadku również elementarną) zmienia charakter ich elementów na przekątny. Wynika stąd wniosek, że orientowalność bocznic w dowolnej sieci wentylacyjnej jest związana w ten sam sposób z ich charakterem, jak to ma miejsce w sieciach elementarnych. Charakter bocznic, a więc i prądu z nią związanego, jest ich właściwością względną. Superpozycja podsieci normalnej z prądem przekątnym innej sieci (lub podsieci) czyni wszystkie prądy przekątnymi. Możliwa jest k-krotna superpozycja jakiegoś typu podsieci z elementem o tym samym charakterze, co zdecydowanie "wzmacnia" daną właściwość prądu podsieci [137].



Rys. 4.12. Przedstawienie p-sieci S w formie superpozycji sieci zewnętrznej R oraz maksymalnych pod-sieci wewnętrznych S_1, S_2, \dots, S_5



Rys. 4.13. Rozkład kanoniczny p-sieci S z rys. 4.12. na nierozkładalną sieć zewnętrzną oraz dziewięć nierozkładalnych podsieci wewnętrznych $S = P_{U_1, U_2, \dots, U_5} (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9)$

4.6. Odwzorowanie struktury przepływowej sieci rozmytej

Jeśli sieć przepływowa zdefiniowana formalnie poprzez trójkę uporządkowaną (4.2) reprezentowana będzie digrafem rozmytym \tilde{G} , to nazywać ją będziemy siecią rozmytą \tilde{S} :

$$\tilde{S} = \langle \tilde{G}, \{a\}, \{h\} \rangle \quad (4.15)$$

W odniesieniu do sieci wentylacyjnej digrafem rozmytym, czyli jej strukturą przepływową, będzie para uporządkowana:

$$\tilde{G} = \langle X, \tilde{R} \rangle \quad (4.16)$$

lub trójka uporządkowana:

$$\tilde{G} = \langle X, U, \tilde{P} \rangle \quad (4.17)$$

gdzie:

$$\tilde{P} = \{ \langle x, u, y \rangle, \mu_p(x, u, y) \}$$

jest relacją rozmytą taką, że:

- (i) jeżeli $x \neq y$ i $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$, to $\langle y, u, x \rangle \notin \tilde{P}$.
- (ii) $\forall \langle x, u, y \rangle \exists \mu_p(x, u, y) \in [0, 1]$, gdzie $x, y \in X$, $u \in U$
 $\tilde{P} = \{ \langle x, y \rangle, \mu_R(x, y) \}$ jest relacją rozmytą, będącą szczególnym przypadkiem relacji rozmytej \tilde{P} , w której:
 - (i) $\forall u \exists \langle x, y \rangle \in X \times X$, taka, że $\langle x, u, y \rangle \in \tilde{P}$ i $\langle y, u, x \rangle \notin \tilde{P}$
 - (ii) $\forall \langle x, y \rangle \exists \mu_p(x, y) \in [0, 1]$

Problemem praktycznym przy odwzorowywaniu struktury przepływowej sieci wentylacyjnej rozmytej jest wyznaczenie funkcji przynależności μ_p . Podobnie jak dla bocznic w strukturze topologicznej można również dla prądów powietrza w strukturze przepływowej określić ją w postaci funkcji algebraicznej:

$$\mu_p(u) = \frac{f(u)}{v(S)} \quad (4.18)$$

lub

$$\mu_p(u) = 1 - \left[\frac{v(S) - f(u)}{v(S)} \right]^2 \quad (4.19)$$

gdzie:

$f(u)$ - wydatek prądu u , m^3/s ,

$v(S)$ - wydatek przepływu w sieci (między jej biegunami) m^3/s .

Jako stopień przynależności prądu do odwzorowywanej struktury przepływowej może być wzięty również tzw. stopień siły prądu λ określony przy znanych wartościach różnic potencjałów $\pi(u)$ przez Rogowa [119] za pomocą wzoru:

$$\lambda(u) = \frac{\pi(u)}{\sum_{u \in U} \pi(u)} \quad (4.20)$$

przy czym

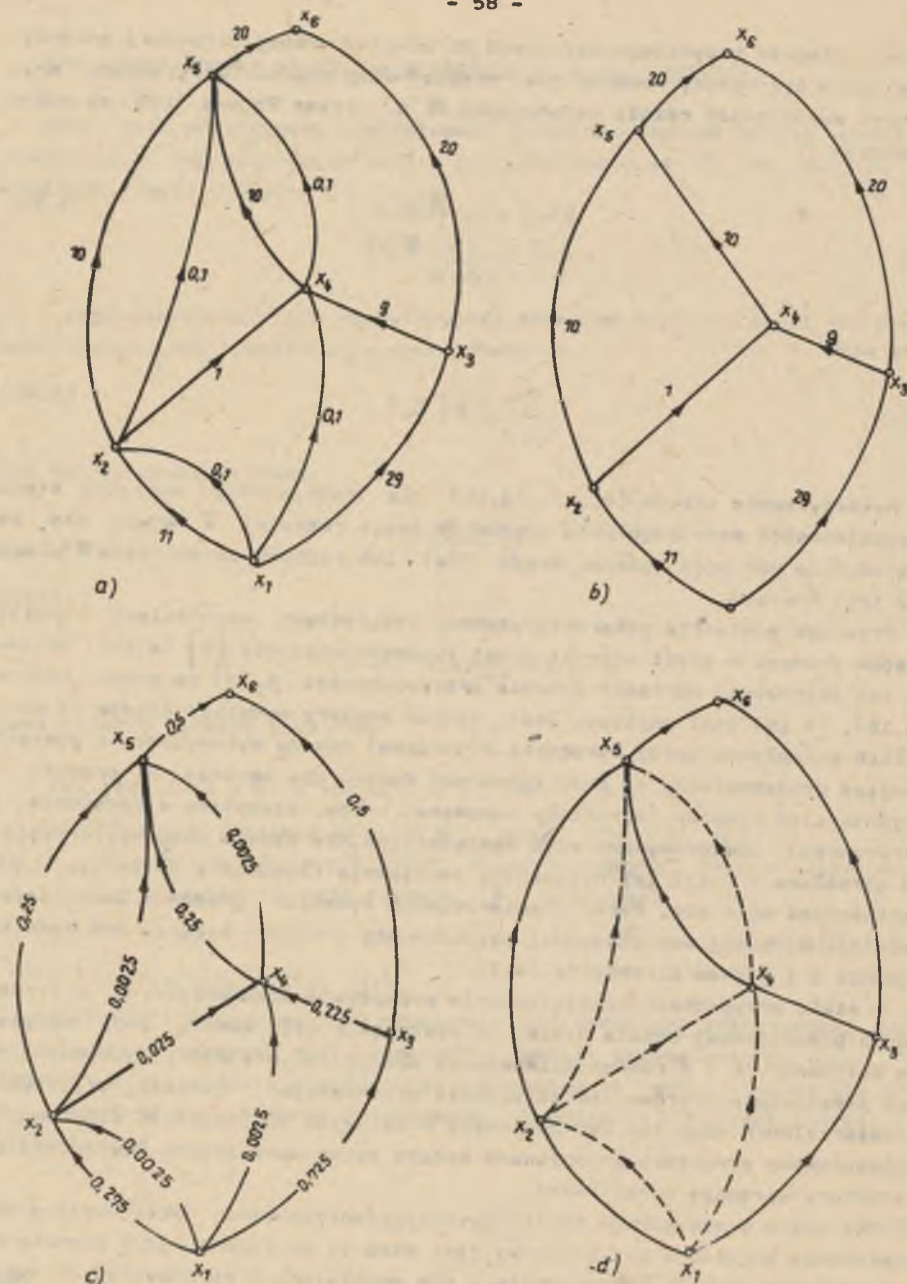
$$\sum_{u \in U} \lambda(u) = 1 \quad (4.21)$$

Wykorzystanie wzorów (4.18), (4.19) dla wyznaczenia wartości stanu przynależności poszczególnych prądów do sieci rozmytej \tilde{S} wiąże się ze znajomością wartości wydatku prądu $f(u)$ lub różnicy potencjałów $\pi(u)$ między jego krańcami.

Przepływ powietrza scharakteryzowany konkretnymi wartościami wydatku prądów stanowi w sieci wentylacyjnej typowe obciążenie $\{h\}$ (4.15). Dlatego też obliczenie wartości stopnia przynależności $\mu_p(u)$ za pomocą wzorów (4.18), (4.19) jest możliwe. Jeśli jednak pomiary wydatków prądów (i wszystkich przepływów przez wyrobiska niedrożne) nie są wykonywane z wystarczającą dokładnością, to może zabraknąć danych dla bocznic z prądami o najmniejszym wydatku (wyrobiska tamowane, zroby, szczeliny w podsadzce i górotworze). Odwzorowywana sieć wentylacyjna nie będzie więc wystarczająco określana z racji jej niepełnego obciążenia (zgodnie z definicją (4.2)) wartościami wydatków. Część niemierzalnych wydatków prądów w istniejącej kopalnianej sieci wentylacyjnej wyznacza się z równań bilansowych wydatku zgodnie z I prawem Kirchhoffa (4.3).

W wielu przypadkach rozmieszczenie przepływów niemierzalnych w strukturze przepływowej będzie takie, że niektóre z nich zawsze będą należeć do antydyndrytu i z równań bilansowych skorzystać nie można, lub można na ich podstawie przeprowadzić obliczenia orientacyjne. Wartości przepływów niemierzalnych mogą też być pominięte w dalszych obliczeniach sieciowych. Rozpatrywana struktura przepływowa będzie zatem uproszczona w stosunku do struktury wstępnie odwzorowanej.

Dla wielu praktycznych analiz sytuacji wentylacyjnej dokładniejsze odwzorowanie struktury przepływowej jest mimo to potrzebne, gdyż pozwala na wyciągnięcie dodatkowych wniosków - nie wynikających na przykład z wyników obliczeń. Przyjmuje się więc umownie, że wartość pomijalnego przepływu $f(u)$ należy do przedziału $(0, a)$, gdzie a jest minimalnym wydatkiem prądu uwzględnianym w obliczeniach lub osiągniętym w efekcie pomiaru. Dla wyznaczania stopnia przynależności tych niemierzalnych przepły-



Rys. 4.14. Przykład wyznaczenia struktury przepływowej dla sieci rozmytej zawierającej prądy o niemierzalnym wydatku $f(u) \leq 0,1$

a) sieć początkowa zawierająca prądy o niemierzalnym wydatku. b) sieć ze zbilansowanymi wydatkami mierzalnymi, c) sieć z liczbowymi wartościami stopnia przynależności, d) sieć z graficznie wyrażoną przynależnością bocznic

wów do struktury przepływowej sieci rozmytej można wykorzystać wzory (4.18), (4.19), biorąc za $f(u)$ dowolną liczbę z przedziału $(0, a)$.

Rys. 4.14 ilustruje sposób osiągnięcia struktury przepływowej sieci rozmytej, jeśli niektóre z prądów mają niemierzalny wydatek. Przyjęto dla nich $f(u) = 0,1$, pomijając tę wartość w bilansie wydatków pozostałych prądów (rys. 4.14b). Rozmytą strukturę z przyporządkowanymi stopniami przynależności poszczególnych prądów przedstawia dla rozpatrywanego przykładu rys. 4.14c.

Przy odwzorowaniu rozmytej struktury przepływowej sieci wentylacyjnej można się także posłużyć bezpośrednio odwzorowaniem rozmytej struktury topologicznej, jeśli nie poddano jej przekształceniu nie będącemu homeomorfizmem. Istnieje przecież ścisły związek między aporem bocznicy a wydatkiem płynącego w niej prądu i na podstawie funkcji, rodzaju lub geometrii wyrobiska, otworu bądź szczeliny można również ocenić wydatek prądu.

Wystarczające też może być graficzne wyrażenie stopni przynależności prądów według umowy przyjętej dla bocznicy w rozdziale 3.6, tym bardziej że przy interpretacji poszczególnych znaków korzystano z właściwości prądów powietrza płynących analizowanymi bocznicami. Dokonując orientacji rozmytego schematu kanonicznego uzyskujemy strukturę przepływową sieci wentylacyjnej rozmytej.

Stopień przynależności można również wyrazić graficznie, jeśli przedziałom liczbowym przypisać określony znak. Na przykład, dla sieci na rys. 4.14d przyjęto znaki linii odpowiadające przedziałom: 1-0,1, 0,1-0,01, 0,01-0,001.

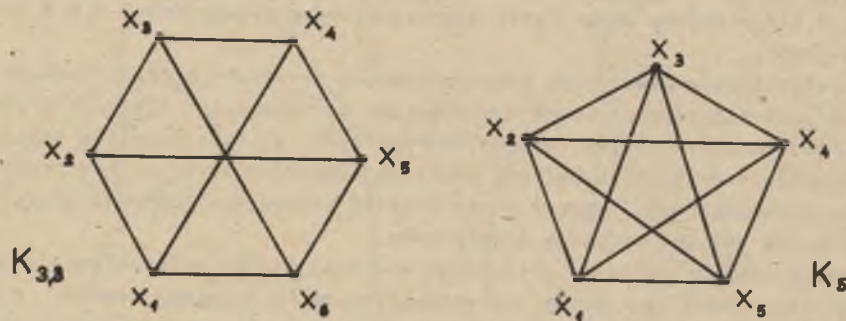
Wystąpienie w niektórych odwzorowywanych strukturach przepływowych pojedynczych hiperbocznicy może nie stwarzać ograniczenia dla ich orientacji. Rozróżnienie rodzaju węzłów incydentnych z hiperbocznicy następuje na podstawie orientacji bocznicy zwykłych (dwuczłonowych), które przylegają do hiperbocznicy, tworząc z nią podsieć szeregową. Hiperbocznicy zorientowaną nazywamy będziemy hiperprądem.

Można również określić orientację większej liczby hiperbocznicy tworzących ciąg, jeśli jego skrajnymi elementami są tylko prądy zwykłe. W obydwu przypadkach orientację hiperprądu (lub ciągu hiperprądów) wyrazić można pośrednio przez zwrot prądów do niego przylegających lub bezpośrednio przez nadanie zwrotu bocznicom gwiazdy, w którą można przekształcić tworzącą go hiperbocznicy. Przy przekształceniu na gwiazdy pojedynczych hiperbocznicy (lub ciągu hiperbocznicy) tworzących połączenia szeregowo z bocznicami do nich przylegającymi nie jest możliwe tworzenie zastępczych bocznicy przekątnych, które po orientacji stawałyby się prądami przekątnymi. Natomiast przy innych połączeniach może dochodzić do powstawania zastępczych bocznicy przekątnych, których orientacja nie może być jednoznaczna. Ilustracją mogą być przykłady przedstawione na rys. 3.12 oraz rys. 3.14 i rys. 3.15 z rozdz. 3.

Warto też uczynić dodatkową uwagę, że w przypadkach, kiedy możliwe jest rozpatrywanie hiperprądu jako elementu składowego struktury przepływowej kopalnianej sieci wentylacyjnej, jest również sensowne określanie stopnia przynależności hiperprądu do tej struktury, a więc rozpatrywanie hiper-sieci rozmytej. Stwarza to jeszcze szersze możliwości odwzorowania rzeczywistych kopalnianych sieci wentylacyjnych.

4.7. Odwzorowanie sieci wentylacyjnej na płaszczyźnie

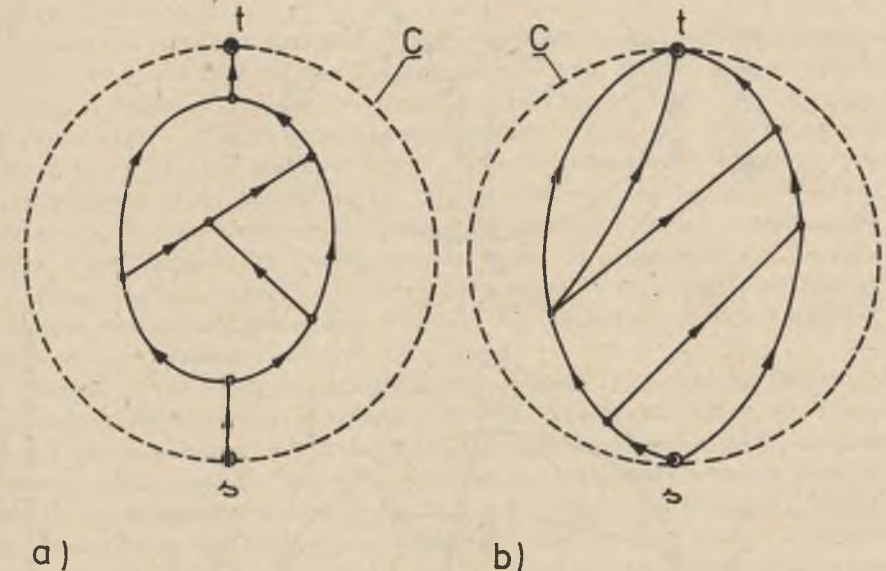
Istotnym problemem przy odwzorowywaniu kopalnianej sieci wentylacyjnej jest możliwość odwzorowania jej na płaszczyźnie. Graf $G = \langle X, U \rangle$ nazywany jest planarnym (płaskim), jeśli można go odwzorować (z dokładnością do homeomorfizmu) na płaszczyźnie w taki sposób, że krawędzie nie mają punktów wspólnych oprócz wierzchołków. Kryterium rozstrzygające o planarności grafu sformułowane zostało przez Kuratowskiego [88], a także niezależnie przez Pontriagina w postaci twierdzenia: graf G jest planarny wtedy i tylko wtedy, jeśli nie zawiera podgrafu homeomorficznego z grafem półpełnym $K_{3,3}$ o sześciu wierzchołkach lub z grafem pełnym K_5 o pięciu wierzchołkach.



Rys. 4.15. Grafy Kuratowskiego $K_{3,3}$ i K_5

Grafy Kuratowskiego $K_{3,3}$ i K_5 przedstawia rys. 4.15. Zagadnienie planarności uważa się w topologii [89] za część obszerniejszego zagadnienia zanurzenia topologicznego zbiorów w powierzchniach i w tym sensie grafy Kuratowskiego są elementarnymi grafami nieznanurzalnymi na płaszczyźnie. Za Feldmanem [49], który rozwinął wcześniejsze prace W.S. Lińskiego i Ju.A. Suszkowa, rozpatrzmy także zanurzenie grafu w płaszczyźnie, aby niektóre wcześniej wyróżnione jego wierzchołki leżały w zadanym porządku na okręgu wybranym na płaszczyźnie, a pozostałe wierzchołki i krawędzie grafu zawarte były wewnątrz tego okręgu. Wierzchołki leżące na okręgu nazywane są

biegunami i Feldman nie ogranicza ich liczby, chociaż rozpatruje grafy o co najmniej trzech biegunach.



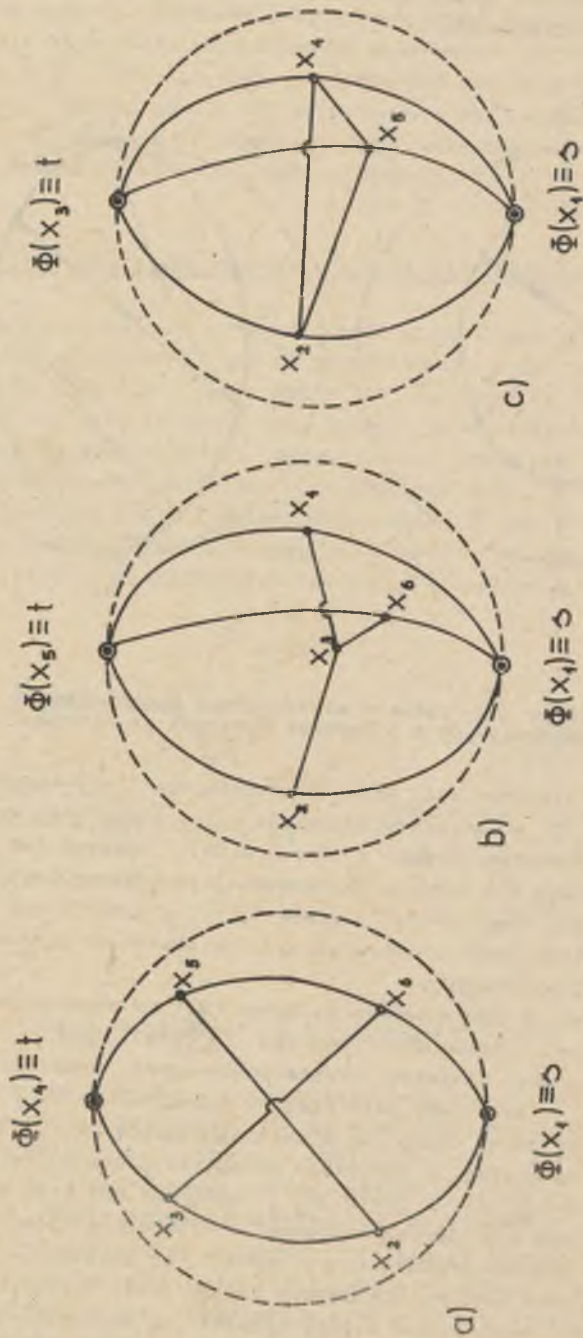
Rys. 4.16. Przykłady zanurzenia w płaszczyźnie dwóch różnych sieci (1,1)-biegunowych z biegunami leżącymi na okręgu C

Zauważmy, że bieguny s, t sieci wentylacyjnej (1,1)-biegunowej S mogą leżeć na okręgu C , a wszystkie pozostałe węzły sieci oraz wszystkie prądy zwarte będą wewnątrz okręgu C (rys. 4.16). Dlatego też wykorzystamy grafy Kuratowskiego dla badania planarności sieci wentylacyjnych (1,1)-biegunowych zgodnie z ideą zawartą w pracy [135], a rozszerzoną we wspólnej pracy z Pawłowskim [112], przekształcając te grafy w ekwiwalentne sieci kryterialne (1,1)-biegunowe.

Oznaczmy przez Φ odwzorowanie biegunów s, t w wybrane punkty okręgu, czyli $\Phi: \{s, t\} \rightarrow C$. Zatem zbiór punktów $C \setminus \{\Phi(s) \cup \Phi(t)\}$ na okręgu C tworzy dwa komponenty spójności będące półokręgami. Oznaczmy je C' i C'' .

W grafie $K_{3,3}$ wybieramy jako bieguny wierzchołki x_1 i x_4 , a następnie odwzorowujemy je na okrąg C w postaci punktów $\Phi(x_1), \Phi(x_4)$. Krawędź (x_1, x_4) odrzucamy, a wszystkie pozostałe wierzchołki i krawędzie leżą wewnątrz okręgu C . Z grafu $K_{3,3}$ utworzyliśmy sieć niezorientowaną S_{Φ} składającą się (oprócz biegunów) z czterech węzłów trzeciego rzędu połączonych ośmioma prądami w taki sposób, że powstało tylko jedno skrzyżowanie (punkt wspólny nie będący węzłem (rys. 4.17a)).

Sieć S_{Φ} jest najmniejszą siecią nieplanarną kryterialną. Jeżeli w grafie $K_{3,3}$ przekształcone zostaną w bieguny $\Phi(x_1), \Phi(x_j)$ dwa dowolne



Rys. 4.17. Trzy nieplanarne sieci kryterialne
a) sieć S_α , b) sieć S_β , c) sieć S_γ

wierzchołki x_i, x_j połączone bezpośrednio krawędzią (x_i, x_j) , to uzyskuje się izomorficzną postać sieci S_α . Graf $K_{3,3}$ można przekształcić w dziewięć izomorficznych postaci sieci S_α z różnie zaetykietowanymi węzłami.

Istnieje jednakże możliwość (na co zwrócono uwagę dopiero w pracy [112]) wyboru biegunów spośród par wierzchołków x_i, x_j grafu $K_{3,3}$ nie będących z sobą w relacji połączeń R, czyli nie tworzących krawędzi (x_i, x_j) . Wybieramy więc w $K_{3,3}$ na przykład wierzchołki x_1, x_5 i odwzorowujemy je na okrąg C w postaci punktów $\phi(x_1), \phi(x_5)$ tworzących bieguny drugiej nieplanarnej sieci kryterialnej S_β . Składa się ona (oprócz biegunów) z czterech węzłów wewnętrznych trzeciego rzędu połączonych dziewięcioma prądami w taki sposób, że utworzone jest jedno skrzyżowanie (rys. 4.17b).

Przedstawiona sieć S_β jest jedną z sześciu izomorficznych postaci różniących się zaetykietowaniem. W sieci S_β odległość między biegunami równa się dwa, natomiast w sieci S_α - trzy.

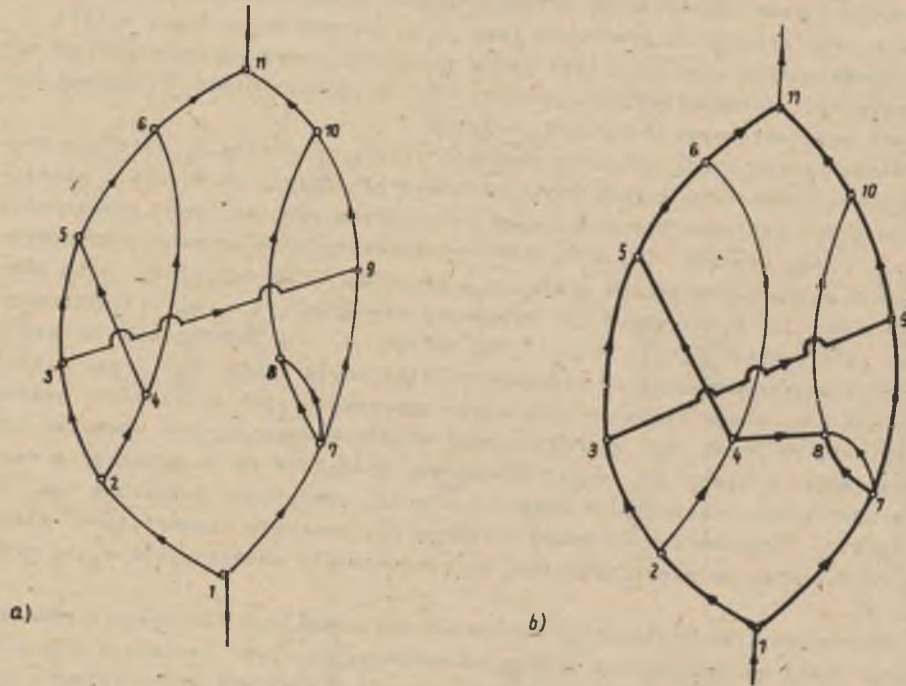
Różne są też rzędy biegunów obydwóch sieci. W grafie K_5 istnieją bezpośrednie połączenia między wszystkimi wierzchołkami, co wynika z właściwości grafu pełnego. Biegunami mogą być wybrane dowolne dwa wierzchołki x_i, x_j , lecz krawędź (x_i, x_j) musi być automatycznie usuwana przy odwzorowaniu wybranych biegunów grafu K_5 na okrąg C. Na przykład, jako bieguny w grafie K_5 (rys. 4.15) wybieramy wierzchołki x_1, x_3 i odwzorowujemy je w punkty $\phi(x_1), \phi(x_3)$ na okręgu C. Po odrzuceniu krawędzi (x_1, x_3) uzyskujemy trzecią nieplanarną sieć kryterialną S_γ (rys. 4.17c). Zawiera ona oprócz biegunów trzy węzły czwartego rzędu i dziewięć prądów. Różni się od sieci S_β głównie rzędem węzłów wewnętrznych i sposobem ich połączenia. W sieci S_β węzły wewnętrzne połączone są "w gwiazdę" z węzłem centralnym, natomiast w sieci S_γ węzły wewnętrzne połączone są "w trójkąt". Przenumerowując węzły uzyskuje się postacie izomorficzne sieci S_γ w stosunku do sieci powstałej po odwzorowaniu wierzchołków x_1, x_3 grafu K_5 .

Stosowanie zmodyfikowanego kryterium Kuratowskiego dla badania planarności sieci wentylacyjnych polega na sprawdzeniu, czy zawierają one podsieci częściowe, które byłyby homeomorficzne z sieciami kryterialnymi S_α, S_β lub S_γ . Badanie planarności sieci wentylacyjnych za pomocą sieci kryterialnych jest o wiele łatwiejsze od stosowania nie przekształconych grafów Kuratowskiego. Idąc tą drogą i nawiązując do idei Tutte [149], być może osiągnie się jakąś efektywną metodę konstrukcyjną testowania planarności sieci za pomocą komputera. Bowiem, zdaniem Deo [6] (str. 149), "problem wyszukiwania prostej, eleganckiej i praktycznej charakterystyki grafów planarnych pozostaje nadal otwarty".

Rys. 4.18a ilustruje przypadek, w którym zawikłana [29] forma schematu kanonicznego sugeruje nieplanarność sieci, w rzeczywistości jednak jest ona planarna. Nie znajdujemy w niej bowiem podsieci częściowej homeomorficznej z siecią S_α, S_β lub S_γ . Natomiast w przypadku schematu z rys.

4.18b, różniące się dołączoną boczną (4,8), można już łatwo wyszukać podgraf częściowy, który jest homeomorficzny z siecią S_{0c} .

Analizując strukturę topologiczną sieci kryterialnych S_{0c} , S_{1c} , S_{2c} łatwo widzieć, że zawierają one bocznicę przekątną. Tak więc warunkiem koniecznym lecz nie wystarczającym do tego, aby sieć wentylacyjna była nieplanarna, jest posiadanie bocznicy przekątnej. Powstaje także pytanie, jak zbadać planarność sieci wentylacyjnej, jeśli niektóre z prądów są hiperprądami. Zykw [166] określa hipergraf H jako planarny, jeśli jego reprezentacja liniowa Kőniga $K(H)$ stanowi graf planarny. Określenie Zykwa można przyjąć również dla hipersieci wentylacyjnych.



Rys. 4.18. Przykłady sieci zawikłanych

a) planarnej, nie zawierającej podsieci częściowej homeomorficznej z siecią S_{0c} , S_{1c} lub S_{2c} , b) nieplanarnej, zawierającej podsieć częściową (linie pogrubione) homeomorficzną z siecią S_{0c} .

5. IDENTYFIKACJA STRUKTURY FUNKCJONALNO-NIEZAWODNOŚCIOWEJ SYSTEMU WENTYLACYJNEGO

5.1. System wentylacyjny kopalni

System jest zbiorem elementów powiązanych relacjami między sobą w sposób umożliwiający osiągnięcie celu, którym jest na ogół określony stan systemu. "Całość to więcej niż suma części" - głosił Arystoteles, lecz właściwości danej całości powstają tylko dlatego, że jest ona utworzona z danych części, pozostających właśnie w tych a nie innych związkach [164]. Spojrzenie całościowe, do czego zmusza system, polega na skupieniu uwagi na tych składnikach i związkach, które są istotne dla realizacji celu systemu.

Jeśli elementami systemu są elementy materialne utworzone przez człowieka, to nazywamy go systemem technicznym. Systemy techniczne budowane są z określonym przeznaczeniem. Może nim być na przykład transport energii lub masy, wymagający ciągłego funkcjonowania systemu. Szczególnym przypadkiem grupy systemów o funkcjonowaniu ciągłym jest system wentylacyjny kopalni.

System wentylacyjny kopalni jest to zbiór wyrobisk górniczych i urządzeń wentylacyjnych, którego celem jest doprowadzanie z atmosfery do miejsc pracy odpowiedniej ilości świeżego powietrza, a po jego wykorzystaniu polegającym na podtrzymaniu pożądanego składu gazowego powietrza i jego parametrów klimatycznych, odprowadzenie tego powietrza - jako zużytego - z powrotem do atmosfery. Proces ciągłego doprowadzania powietrza do miejsc pracy w kopalni i jego odprowadzania nazywany jest krótko przewietrzaniem kopalni.

Nie można jednak uważać, że elementami systemu wentylacyjnego są wszystkie wyrobiska i zainstalowane w nich urządzenia wentylacyjne, chociaż na pewno wzajemne powiązanie wszystkich wyrobisk i urządzeń oddziałuje na właściwości systemu wentylacyjnego w całości. Duża liczba wyrobisk w sieci wentylacyjnej czyniłaby podejście systemowe bezużytecznym, gdyby je wszystkie traktować jako elementy systemu.

Gdyby na przykład przyjąć, że każda bocznicą w sieci wentylacyjnej kopalni o 300 bocznicach może przebywać w dwóch stanach (teoretycznie jest to uzasadnione), to wszystkich możliwych stanów systemu wentylacyjnego o 300 elementach byłoby 2^{300} . Liczba ta przekracza tzw. ograniczenia kwantowe Bremermanna wynoszące 10^{70} bitów, uznane za granicę dla wielkości fizycznie osiągalnych [74]. Również możliwych powiązań między elementami

jest $\frac{1}{2} n(n-1) = 45\ 000$. Wyróżnić więc należy, jako elementy systemu, tylko część bocznic wentylacyjnych, to znaczy te z nich, których zachowanie będzie najbardziej zmienne w rzeczywistych warunkach funkcjonowania systemu. Wyróżnienie elementów systemu wentylacyjnego jest więc w dużym stopniu umowne i nie może być przeprowadzone jednoznacznie. Zdarzenia oczekiwane wyróżnionych elementów systemu wentylacyjnego mogą być określone tylko z prawdopodobieństwem.

Zmianę warunków funkcjonowania systemu wentylacyjnego można spowodować nie tylko urządzeniami zasilającymi, lecz także urządzeniami sterującymi, takimi jak: tamy regulacyjne lub wentylatory pomocnicze. Wyrobiska zawierające źródła ruchu oraz urządzenia sterujące muszą być więc wyróżnione jako elementy systemu wentylacyjnego.

Do zbioru elementów wyróżnionych należą też muszą wyrobiska zawierające przodki robocze, komory naprawcze, komory obsługi i miejsca powstawania lub wypływu niebezpiecznych gazów. Elementy, w których następuje zużytkowanie dostarczanego powietrza, nazywać będziemy odbiorami powietrza.

Największa niepewność dotyczyć będzie tych elementów systemu wentylacyjnego, na które w czasie jego funkcjonowania wpływa duża liczba czynników przypadkowych, związanych z otoczeniem. Powodują one losową zmianę warunków funkcjonowania systemu wentylacyjnego. Elementami tymi będą wyrobiska ulegające zawałom, zamuleniu podsadzką hydrauliczną lub zalaniu wodą, wyrobiska zawierające tamy wentylacyjne otwierane lub niszczone, a także wyrobiska z zainstalowanymi wentylatorami (pomocniczymi, strumieniowymi), które ulegać mogą wyłączeniu. Występowanie w systemie wentylacyjnym czynników otoczenia spowodowane jest tąpnięciami, awariami instalacji podsadzkowych i wodnych, kolizyjnym przecinaniem się dróg odstawy urobku czy transportu materiałów z drogami przepływu powietrza, w tym także kolizyjnym przecinaniem się dróg ruchu załogi z drogami przepływu powietrza, niepewnością zasilania w energię wentylatorów i tam automatycznych.

Tak więc jedną z najważniejszych cech systemu wentylacyjnego, objawiającą się w procesie jego funkcjonowania, jest jego niezawodność. Rzuca ona bowiem na efekt końcowy działania systemu wentylacyjnego, podobnie jak dla każdego innego systemu technicznego.

5.2. Niezawodność funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni

Teoria niezawodności jako nauka zrodziła się w dyscyplinach związanych z elektroniką i cybernetyką, skąd rozszerzyła się na inne dyscypliny zajmujące się dowolnymi obiektami technicznymi. Wypracowano w nich metody praktycznych i teoretycznych analiz niezawodnościowych różnych systemów inżynierskich [6, 54, 79, 96, 154]. Definicje niezawodności, które wykorzystuje się dla tych analiz, formułowane są jako definicje opisowe bądź

normatywne [71]. Według definicji opisowej niezawodność obiektu jest to jego zdolność do zachowania istotnych własności w dopuszczalnych granicach, w określonych warunkach istnienia obiektu, w ciągu określonego okresu czasu. Natomiast definicja normatywna określa niezawodność obiektu jako prawdopodobieństwo spełnienia przez obiekt stawianych mu wymagań. Ponieważ celem funkcjonowania systemu wentylacyjnego jest przewietrzanie miejsc pracy (a ogólniej - kopalni), to treścią definicji opisowej niezawodności systemu wentylacyjnego będzie jego zdolność do utrzymania rozprężności powietrza w granicach wartości zadanych.

Sformułowaną w tym sensie definicję niezawodności posługuje się większość autorów prac poświęconych tematowi funkcjonowania systemu wentylacyjnego [76, 100, 120]. Pod pojęciem uszkodzenia systemu wentylacyjnego rozumieją więc zdarzenie polegające na zmniejszeniu się poniżej wartości dopuszczalnej wydatku chociażby jednego prądu niezależnego. Definicje opisowe niezawodności nie umożliwiają jednakże jej oceny, gdyż do tego konieczna jest wielkość charakteryzująca zdolność systemu do realizacji zadania. Wielkością tą jest prawdopodobieństwo wypełnienia zadania, a definicja niezawodności oparta na tym prawdopodobieństwie jest właśnie definicją normatywną. Dla realizacji przez system wentylacyjny kopalni postawionego przed nim zadania konieczna jest bowiem poprawna praca wszystkich tych jego elementów, które oddziałują na przepływ powietrza. Oznacza to zachowanie wartości ich parametrów w granicach dopuszczalnej tolerancji. Element systemu, który przestaje pracować poprawnie, nazywamy uszkodzonym. Podstawowym parametrem elementów systemu wentylacyjnego jest przebieg charakterystyki potencjalno-wydajnościowej. Dla wyrobisk górniczych i tam wentylacyjnych przebieg jej dany jest oporem wentylacyjnym, natomiast dla wentylatorów strumieniowych i zasłon powietrznych przebieg jej dany jest kilkoma wartościami odpowiednich współczynników w ogólniejszych równaniach charakterystyk.

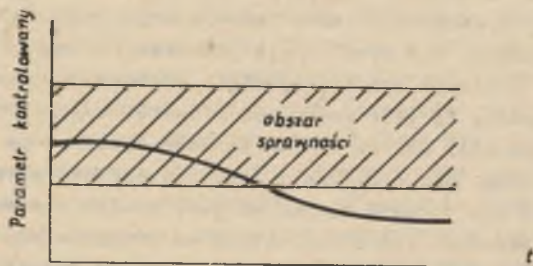
Uszkodzeniem urządzenia wentylacyjnego lub wyrobiska górniczego w sensie niezawodnościowym będzie więc każde zdarzenie powodujące zmianę jego charakterystyki poza dopuszczalny zakres tolerancji, przez co następuje na przeciąg określonego czasu utrata zdolności urządzenia wentylacyjnego bądź wyrobiska do pełnienia zaplanowanej funkcji w systemie wentylacyjnym kopalni.

Ze względu na sposób oddziaływania na prądy powietrza uszkodzenia elementów systemu wentylacyjnego dzielić będziemy na:

- uszkodzenie "otwarcia",
- uszkodzenie "zamknięcia",

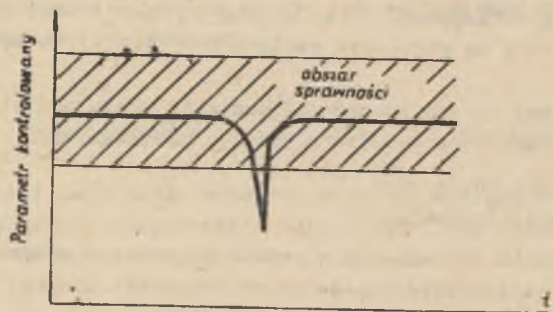
Wystąpienie uszkodzenia elementu systemu ma charakter losowy i jako zdarzenie jest przejściem ze stanu zdatności (pracy) do stanu uszkodzenia. Może ono zachodzić w trojaki sposób [163]:

1° Na skutek powolnych, sumujących się procesów starzeniowych (rys.5.1) polegających - w przypadku wyrobisk - na ich zaciskaniu, zamulaniu lub zanieczyszczeniu, w przypadku tam wentylacyjnych - na ich spękaniu, zruszeniu powięzania z ociosami lub wyschnięciu materiału porowatego, a w przypadku innych urządzeń wentylacyjnych również na pewnej degradacji materiałowej, pojawieniu się luzów między elementami ruchomymi, zmianie kształtu poszczególnych części składowych. Przejście elementu systemu wentylacyjnego do stanu uszkodzenia jest więc stopniowe, a objawy sygnalizowane. Procesy starzeniowe są w zasadzie nieodwracalne. W kopalniach spotykamy się z ich usuwaniem poprzez przebudowę wyrobisk i remont kapitalny urządzeń wentylacyjnych. W analizie funkcjonowania systemu wentylacyjnego zdarzeń tego typu nie będziemy analizować.



Rys. 5.1. Ilustracja powolnego przejścia elementu systemu wentylacyjnego ze stanu zdatności do stanu uszkodzenia

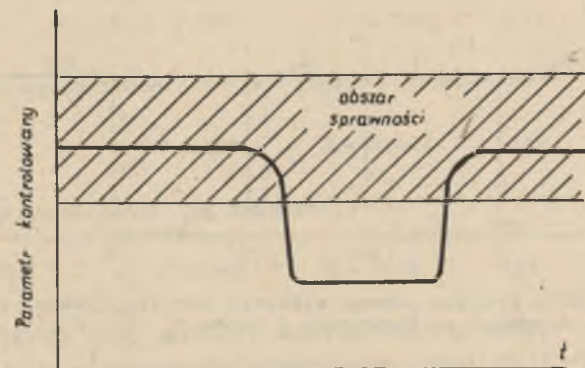
2° W wyniku pojawienia się procesów odwracalnych o względnie dużej prędkości przebiegu, wywołanych przez chwilowe przekroczenie dopuszczalnych wartości różnych czynników otoczenia (rys. 5.2). Obserwujemy je najczęściej w pracy tam wentylacyjnych w postaci chwilowych otwarć przez przechodzących ludzi lub przejeżdżające wozy oponowe i inne środki transportowe. W przypadku wyrobisk występują jako chwilowe (czasowe) zmiany o-



Rys. 5.2. Ilustracja skokowego przejścia elementu systemu wentylacyjnego ze stanu zdatności do chwilowego stanu uszkodzenia

porów w związku z przejazdem pociągu, skipu czy klatki wyciągowej. Oddziałując na system wentylacyjny wywołują pulsacje wydatków prądów. W analizie funkcjonowania systemu również nie będziemy tych zdarzeń uwzględniać.

3° W wyniku nagłych skokowych samoczynnie nieodwracalnych (przez co trwających dłużej) zmian wartości parametru elementu poza zakres dopuszczalny. W rozpatrywanych praktycznie przedziałach czasowych zmiany te można uznać jako momentalne (rys. 5.3). Tylko tego typu zdarzenia będą przedmiotem dalszej analizy.



Rys. 5.3. Ilustracja skokowego przejścia do stanu uszkodzenia trwającego dłuższy okres czasu

Ze względu na sposób pracy urządzenia wentylacyjne i wyrobiska górnicze podlegające nagłym uszkodzeniom należy traktować jako obiekty odnawialne. Czas trwania uszkodzenia utożsamiamy z czasem trwania odnowy, chociaż nie musi on być w pełni wykorzystany na działania naprawcze. Oznaczmy czas pracy elementu systemu przez T_p , a czas trwania uszkodzenia (odnowy) przez T_u . Element systemu może się znaleźć w jednym z dwóch stanów opisanych dyskretną binarną zmienną losową ξ :

$$\xi(t) = \begin{cases} 1 & \text{dla } t \in T_p \\ 0 & \text{dla } t \in T_u \end{cases} \quad (5.1)$$

Realizacja procesu odnowy uszkodzalnego elementu systemu wentylacyjnego będzie więc miała przebieg jak na rys. 5.4.

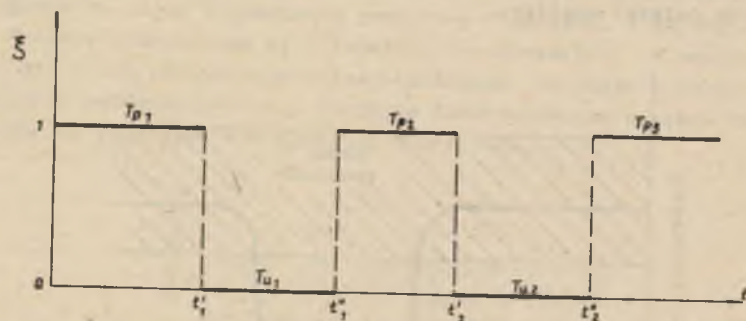
Chwile

$$t'_n = T_{p1} + T_{u1} + T_{p2} + T_{u2} + \dots + T_{u(n-1)} + T_{pn} \quad (5.2)$$

nazywane są chwilami uszkodzenia elementu, a chwile

$$t_n^* = T_{p1} + T_{u1} + T_{p2} + T_{u2} + \dots + T_{pn} + T_{un} \quad (5.3)$$

nazywane są chwilami odnowy elementu.



Rys. 5.4. Ilustracja procesu odnowy elementu wentylacyjnego z odpowiadającym mu strumieniem uszkodzeń i odnow $t'_1, t''_1, t'_2, t''_2, \dots$

Znając wartości oczekiwane \bar{T}_p i \bar{T}_u dla zmiennych losowych T_{p1} i T_{u1} określić można tzw. intensywności uszkodzeń oraz odnowy:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{T}_p} \quad (5.4)$$

$$\mu = \frac{1}{\bar{T}_u} \quad (5.5)$$

Podstawowym wskaźnikiem niezawodności elementu systemu wentylacyjnego jest współczynnik gotowości K_g , którego wartość stacjonarna ma postać:

$$K_g = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{T}_p}{\bar{T}_p + \bar{T}_u} \quad (5.6)$$

Prawdopodobieństwo bezuszkodzeniowej pracy elementu w przedziale czasu $(t, t + \tau)$, gdy do chwili t mogły wystąpić uszkodzenia, nazywamy niezawodnością elementu i dla dużych t wyrażamy (zgodnie z przyjętą hipotezą o rozkładzie wykładniczym) wzorem:

$$R(\tau) = K_g \cdot e^{-\lambda \tau} \quad (5.7)$$

Przebiegi procesów uszkodzeń (odnowy) dla elementów systemu wentylacyjnego, a tym samym wartości λ, μ, K_g wyznacza się na podstawie badań statystycznych konkretnych obiektów dołowych. Pierwsze wyniki takich badań przedstawili autorzy radzieccy Rogow [120], Wasserman [152], Mjasnikow i Pawłow [102], Kogon [76].

Według pracy [122] wartości K_g i λ dla tam wentylacyjnych w kopalniach Karagandy wynoszą:

- dla tam w wyrobiskach z transportem kołowym:

$$K_g = 0,987 \quad \lambda = 0,154 \quad 1/d$$

- dla tam w wyrobiskach z innym rodzajem transportu:

$$K_g = 0,998 \quad \lambda = 0,027 \quad 1/d$$

- dla tam w wyrobiskach bez transportu:

$$K_g = 0,999 \quad \lambda = 0,05 \quad 1/d$$

Według pracy [102] wartości współczynnika gotowości K_g typowych szluz wentylacyjnych przejazdowych stosowanych w oddziałach wydobywczych kopalń Kuzbassu wynoszą: 0,993-0,997. Podobne badania statystyczne w naszych kopalniach zostały dopiero zapoczątkowane. Obserwacje strumieni uszkodzeń tam wentylacyjnych prowadzi się na przykład za pomocą mikromanometrów rejestrujących z czujnikami naporu zainstalowanymi przed i za tamami. Pracę wentylatorów rejestruje się poprzez obserwacje zasilania energią lub także za pomocą kontroli wywoływanego naporu.

Nagłe oddziaływanie czynników otoczenia na wyrobiska uwidaczniają natychmiastowe skutki w odstawie, transporcie lub komunikacji. Zawały wyrobisk może na przykład wykrywać i również rejestrować aparatura sejsmiczna. Obserwacje innych zdarzeń w wyrobiskach są nieco trudniejsze, a tym samym mniej dokładne.

Przy wyborze wyrobisk jako elementów systemu wentylacyjnego pominięto bardzo wiele z nich z powodu mało prawdopodobnego ich wpływu na zmianę funkcjonowania systemu. Wszystkie nie wyróżnione wyrobiska traktowane są więc jako bocznicę sieci wentylacyjnej realizujące powiązania i współdziałania elementów wyróżnionych w systemie wentylacyjnym. Nie oddziałują więc wzajemnie na siebie, lecz warunkują istnienie oddziaływania między elementami wyróżnionymi; czynią ich układ odpowiednio zorganizowany. Zmiana wartości relacji między elementami systemu wentylacyjnego zależy zatem od zmiany parametrów elementów, a nie od zmiany parametrów wyrobisk realizujących te relacje.

Jednakże w szczególnych przypadkach, chociaż bardzo mało prawdopodobnych w odniesieniu do normalnych warunków funkcjonowania systemu wentyla-

cyjnego, może dochodzić do ujawnienia się roli wyrobisk pominiętych przy analizie bądź syntezie systemu. Na przykład pożar podziemny, wybuch metanu lub pyłu węglowego, zmieniając efektywność energijną wyrobiska, naruszają nie tylko warunki funkcjonowania systemu wentylacyjnego, lecz także niosą inne, poważniejsze zagrożenia. Z tego też względu zdarzenia te mają znamiona katastrof górniczych, a związane z nimi działania systemu wentylacyjnego nigdy nie są rozpatrywane w odniesieniu do jego normalnych celów. Nie ma więc potrzeby uwzględnić ich jako czynników wyróżniających konkretne wyrobisko sieci wentylacyjnej. Również nie są podstawą wyróżnienia inne niebezpieczne zdarzenia, bardzo rzadkie lub nawet jednorazowe w stosunku do wyrobiska, jak na przykład: zawał w uspokojonym górotworze, zawał na skutek zniszczenia obudowy środkiem transportu, przerwy wody lub podsadzki przez tamy lub filary zabezpieczające.

5.3. Struktura systemu i jego opis przez wejścia-wyjścia

Układ relacji pomiędzy elementami systemu wentylacyjnego nazywać będziemy jego strukturą. Za pracą [82] zdefiniujemy więc formalnie STRUKTURĘ systemu wentylacyjnego jako parę uporządkowaną:

$$\text{STRUKTURA} = \langle X, \{R_m\} \rangle \quad (5.8)$$

gdzie:

- X - zbiór wyróżnionych elementów,
- $\{R_m\}$ - relacje określone na zbiorze X , z których każda reprezentuje pewien rodzaj związków i zależności między elementami $x \in X$.

Jeśli relacje R_m wyrażać będą więź funkcjonalną między elementami zbioru X , charakteryzując ich stopień zaangażowania (lub samo zaangażowanie) przy realizacji celu systemu, to jego struktura z takimi relacjami nazywana jest strukturą funkcjonalną. Zatem STRUKTURA jest nie tylko czynnikiem, który tworzy system wentylacyjny, lecz również określa sposób jego funkcjonowania. Powstaje pytanie o metodę określania danej relacji w sposób wyróżniający ją wśród innych możliwych relacji między elementami systemu; jest to więc pytanie o metodę opisu systemu. Według Mesaroviča [74] istnieją dwie podstawowe metody:

- 1^o metoda opisu przez wejścia-wyjścia (WE-WY), w której zachowanie się systemu rozpatruje się jako relację dwuargumentową określoną na iloczynie kartezjańskim dwóch rozłącznych rodzin zbiorów lub dwóch zbiorów,
- 2^o metoda opisu teleologicznego, w której relacja dwuargumentowa jest opisana w sposób niejawni jako proces dążenia do celu.

Do systemu wentylacyjnego kopalni stosować będziemy opis przez wejścia-wyjścia nie wymagający uwzględnienia mechanizmu zjawisk zachodzących w systemie.

Wartości liczbowe funkcji przepływu $f(x,y)$, czyli tzw. wydatek przepływu prądu $\langle x,y \rangle$, oznaczymy przez \dot{V} . Różnicę potencjałów $\pi(x,y) = p(x) - p(y)$ w bocznicie bezźródłowej nazwiemy natomiast stratą naporu W .

Zbiór wydatków przepływu mierzonych jednocześnie we wszystkich m bocznicach sieci $S = \langle G, \{a\}, \{h\} \rangle$ określa stan przepływowi w sieci w postaci kolumnowego "wektora wydatków" $\vec{V} = \text{colon} [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_m]$. Niech struktura grafu $G(n,m)$ będzie odwzorowana przez macierz incydencji A .

I prawo Kirchhoffa można zapisać zatem w postaci:

$$A\vec{V} = 0 \quad (5.9)$$

z której widzimy, że wektor wydatków \vec{V} jest ortogonalny do każdego z wektorów wierszowych w macierzy incydencji [14, 46].

Ponieważ wektory wierszowe w macierzy A rozpinają całą $(n-1)$ -wymiarową podprzestrzeń przekrojów (związana z wyborem dendrytu grafu), więc wektor \vec{V} jest do niej ortogonalny. Uzupełnieniem ortogonalnym dla podprzestrzeni przekrojów jest $(m - n + 1)$ -wymiarowa podprzestrzeń cykli, a zatem w niej leży wektor \vec{V} .

Baza podprzestrzeni cykli wybierana jest w oparciu o cięciwy dendrytu i tworzy ją zbiór $m - n + 1$ liniowo niezależnych cyklowektorów.

Zatem

$$\vec{V} = C_c^T \vec{V}_c \quad (5.10)$$

gdzie: $\vec{V}_c = \text{colon} [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_c]$ jest wektorem kolumnowym wydatków cyklowych Maxwella zawierającym $\dot{V}_c = m - n + 1$ współrzędnych, natomiast C_c jest zredukowaną macierzą cykli tzw. macierzą cyklomatyczną.

Ponieważ wydatek cyklowy reprezentuje również wydatek przepływu prądu w cięciwach dendrytu, więc prądy te nazywane są niezależnymi [137], a wektor \vec{V}_c - wektorem prądów niezależnych. Zbiór wszystkich wektorów \vec{V}_c stanowiących możliwe rozwiązanie układu (5.10) tworzy tzw. przestrzeń przepływową \vec{V} .

Zbiór strat naporu mierzonych równocześnie we wszystkich m bocznicach sieci $S = \langle G, \{a\}, \{h\} \rangle$ określa stan potencjalny w sieci w postaci kolumnowego "wektora naporów" $\vec{W} = \text{colon} [W_1, W_2, \dots, W_m]$. Dla bocznic źródłowych współrzędną tego wektora jest przyrost - a nie strata - naporu. Związek wektora kolumnowego \vec{W} z macierzą cykli C wyraża II prawo Kirchhoffa:

$$C\vec{W} = 0 \quad (5.11)$$

Wynika z niego, że wektor \vec{W} jest ortogonalny do podprzestrzeni cykli rozpinaanej przez wektory wierszowe macierzy cykli C . Wektor \vec{W} leży więc w uzupełnieniu ortogonalnym dla podprzestrzeni cykli, czyli w $(n-1)$ -wymiarowej podprzestrzeni przekrojów.

Zatem:

$$\vec{W} = A_Q^T \vec{W}_Q \tag{5.12}$$

gdzie: $\vec{W}_Q = \text{colon}[W_1, W_2, \dots, W_n]$ jest wektorem naporów (potencjałów) węzłowych zawierających $Q = n-1$ współrzędnych, a A_Q jest zredukowaną macierzą incydencji. Wszystkie $n-1$ węzły są więc niezależne ze względu na jeden węzeł odniesienia. Zbiór wszystkich wektorów \vec{W} stanowiących możliwe rozwiązanie układu (5.12) tworzy tzw. przestrzeń potencjalną \mathcal{H} .

Między przestrzenią potencjalną i przepływową istnieje związek dla stanów ustalonych sieci wynikający z zależności (4.7) pomiędzy funkcją potencjalną i przepływową. Oznacza to, że nie każdy stan potencjalny i przepływowy jest równocześnie możliwy. Uogólnieniem prawa Guibala-Devilleza, wyrażonego zależnościami (4.7) i (4.8), jest związek między przestrzenią potencjalną i przepływową w sieci wentylacyjnej:

$$\vec{V} = g(\mathcal{H}) \tag{5.13}$$

Przekształcenie g posiada charakter temperamentu sieci i nie może być potraktowane jako operator liniowy.

Wektor \vec{V}_Q wydatków prądów niezależnych, należący do przestrzeni przepływowej \mathcal{V} , może być traktowany jako wyjście systemu wentylacyjnego. Nie jest natomiast możliwe przyjmowanie wektora naporu \vec{W}_Q jako wejścia systemu, gdyż nie charakteryzują one elementów będących przyczyną wymuszeń. Wektor \vec{V} może natomiast stanowić inny rodzaj wyjścia systemu, gdyż związek między przestrzenią potencjalną i przepływową w sieci wentylacyjnej może być też przedstawiony jako uogólnienie prawa Girarda-d'Aubissona-Atkinsona:

$$\mathcal{H} = f(\mathcal{V}) \tag{5.14}$$

w którym przekształcenie f posiada charakter oporu sieci i stanowi odwrotność przekształcenia g , tj. $f^{-1} = g$.

Z przekształceniami f lub g można związać trzeci wektor charakteryzujący system wentylacyjny, a mianowicie wektor oporów aerodynamicznych $\vec{R} = [R_1, R_2, \dots, R_m]$. Wektor ten traktować będziemy umownie jako wektor oporów, gdyż niektóre współrzędne nie będą parametrami R wiążącymi zmienne W, \dot{V} w równaniu charakterystyki wyrobiska, lecz parametrami symbolicznymi dla ciągu k_1, k_2, \dots, k_n parametrów występujących w równaniu charakte-

rystyki wentylatora lub strumienicy. np. dla wentylatora w bocznicy u_k o charakterystyce $\Delta p = k_1 - k_2 \dot{V} - k_3 \dot{V}^2$ opór symboliczny $R_k = \langle k_1, k_2, k_3 \rangle$.

Określamy wektor wydatków \vec{V}_Z w taki sposób, że jego współrzędnymi są wszystkie wartości wydatków w odbiorach $Z \subset Z$. Będzie to możliwe, jeśli przewietrzanie miejsc pracy (stanowiących przedmiotowy zbiór Z odbiorów powietrza) będzie niezależne. Wektor ten będziemy dalej oznaczać \vec{V}_Z . Jeśli jego wymiar jest większy od liczby odbiorów $|Z|$, wtedy można dołączyć do nich odbiory fikcyjne w bocznicach stanowiących cięciwy dendrytu wybranego* ze względu na odbiory właściwe.

Zatem wektor wydatków prądów niezależnych \vec{V}_Z może być wyrażony jako funkcja wektora oporów \vec{R} :

$$\vec{V}_Z = \vec{F}(\vec{R}) \tag{5.15}$$

Niech składowymi wektora \vec{R} będą tylko te opory lub charakterystyki, które podlegają zmianom w czasie funkcjonowania systemu wentylacyjnego, a więc charakteryzują elementy podlegające wymuszeniom celowym lub przypadkowym. Oznaczmy zbiór tych elementów przez Y . Stanowi on łącznie ze zbiorem odbiorów Z zbiór X elementów wyróżnionych w systemie wentylacyjnym, zgodnie z wymogiem formalnej definicji (5.8) struktury systemu.

Zatem $X = Y \cup Z$ oraz $Y \cap Z = \emptyset$, mimo że mogą być w sieci wentylacyjnej bocznicę zawierające na przykład wyrobisko z tamą wentylacyjną oraz wyrobisko eksploatacyjne stanowiące odbiór powietrza. Bocznicę charakteryzującą się powyższą własnością traktowana będzie jako bocznicę z dwoma różnymi elementami systemu wentylacyjnego. Z podzbiorem Y zbioru X związać możemy wektor wejścia systemu wentylacyjnego, podobnie jak z podzbiorem $Z \subset X$ związaliśmy wektor wyjścia. Uzyskana nowa zależność jest więc opisem reguły funkcjonowania systemu poprzez wejścia - wyjścia:

$$\vec{V}_Z = \vec{F}(\vec{R}_Y) \tag{5.16}$$

gdzie:

- $\vec{R}_Y \subset \vec{R}$ - wektor wejść systemu wentylacyjnego,
- \vec{V}_Z - wektor wyjść systemu wentylacyjnego,
- \vec{F} - funkcja wektorowa przetwarzająca sygnały wejściowe na wyjściowe, czyli zmiany oporów bądź charakterystyk na zmiany wydatków. Wyraża ona strukturę funkcjonalną systemu.

5.4. Więź funkcjonalna między odbiorami powietrza a elementami podlegającymi wymuszeniu

Zgodnie z zależnością (5.16) można napisać dla dowolnego odbioru z_j :

$$\dot{V}_j = F_j(R_{Yj}) \quad j = 1, 2, \dots, |Z| \quad (5.17)$$

gdzie:

$R_{Yj} \subset \bar{R}_Y$ - podzbiór wejść wpływających istotnie na zmianę wartości wyjściowej \dot{V}_j ,

F_j - funkcja przetwarzania związana z odbiorem z_j .

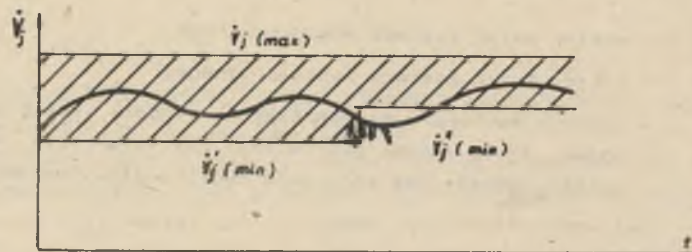
Zapotrzebowanie powietrza w dowolnym odbiorze z_j jest ograniczone dopuszczalnymi wartościami: minimalną, wynikającą zwykle z konieczności niedopuszczenia do powstania określonych stężeń gazu oraz maksymalną, wynikającą zwykle z konieczności niedopuszczenia do powstania zbyt dużej prędkości powietrza lub strat powietrza. Wymagania bezpieczeństwa łączone są na ogół z wymaganiami techniczno-ekonomicznymi.

Tak więc dla każdego odbioru z_j mamy warunek:

$$\dot{V}_j(\min) < \dot{V}_j \leq \dot{V}_j(\max) \quad (5.18)$$

Znaczenie odbioru powiązemy z tolerancją zapotrzebowania powietrza, a ściślej - z szerokością przedziału (5.18). Przedziały węże świadczą o większym znaczeniu odbioru i odwrotnie. Tak jest na przykład w odniesieniu do przodków ścianowych o dużym wydobywaniu i wysokiej kategorii metanowości.

Z punktu widzenia realizacji zadania systemu wentylacyjnego uznajemy więc, że przynależność wartości \dot{V}_j do przedziału zapotrzebowania $[\dot{V}_j(\min), \dot{V}_j(\max)]$ jest jednokowo ważna dla wszystkich odbiorów.



Rys. 5.5. Ilustracja wyjścia wartości \dot{V}_j w odbiorze z_j poza przedział zapotrzebowania na skutek jego zawężenia.

Ze względu na zmienność warunków górniczo-technicznych w wyrobiskach stanowiących odbiory powietrza zachodzi również zmiana przedziałów zapotrzebowania $[\dot{V}_j(\min), \dot{V}_j(\max)]$. Dlatego możliwe jest wyjście wartości \dot{V}_j również z tego powodu poza przedział zapotrzebowania (rys. 5.5). Również mało uchwytne, powolne zmiany parametrów wszystkich wyrobisk, a szczególnie eksploatacyjnych, powodują systematyczne przesuwanie się wartości \dot{V}_j ku granicom przedziału i ich przekroczenie. Konieczna jest wtedy zmiana poziomu wymuszenia w elementach zasilających bądź sterujących systemem wentylacyjnym - oddziałujących na odbiór z_j zgodnie z zależnością (5.17). Funkcje F_j wyraża wtedy więź funkcjonalną między odbiorem z_j a tymi elementami y_1 , które zdolne są sterować wydatkiem w odbiorze z_j . Wyjście wartości \dot{V}_j poza przedział zapotrzebowania można nazwać uszkodzeniem odbioru, jeśli spowodowane zostało nagłym wymuszeniem przypadkowo związanym z uszkodzeniem jakiegoś elementu systemu. Może nim być element zasilający, sterujący lub inny wyróżniony pod tym względem w systemie.

Funkcja F_j wyraża więc także więź funkcjonalną między odbiorem z_j a wszystkimi wyróżnionymi elementami wymuszającymi y_1 , zdolnymi uszkodzić odbiór z_j .

Maksymalną celową zmianę charakterystyk elementów sterujących można również traktować jako zmianę wywołaną uszkodzeniem. Zatem badanie powiązań funkcjonalnych w systemie wentylacyjnym najwygodniej prowadzić z pomocy niezawodności funkcjonowania systemu.

5.5. System wentylacyjny jako system logiczny kombinacyjny

Dla każdego odbioru $z \in Z$ wyróżnimy dwa stany, które opiszemy zmienną losową binarną Ψ taką, że:

$$\Psi = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \dot{V}_{\min} < \dot{V} < \dot{V}_{\max} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (5.19)$$

Dla $\Psi = 1$ system wentylacyjny realizuje założony cel ze względu na odbiór z , jeśli $\Psi = 0$ cel systemu nie jest realizowany. Tak więc zarówno elementy charakteryzujące wejścia systemu wentylacyjnego (zmieniające się pod wpływem uszkodzenia przebieg charakterystyk), jak również elementy charakteryzujące wyjścia (zmiana wydatków w odbiorach pod wpływem wymuszeń na wejściu) mogą być opisane zmienną binarną.

System wentylacyjny określony zależnością (5.16) sprowadziliśmy więc do systemu logicznego kombinacyjnego [105]:

$$\Psi = \phi(\mathbb{R}) \quad (5.20)$$

gdzie:

- 1) $\Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_l$, jest zbiorem wejść w postaci iloczynu kartezjańskiego zbiorów dwuelementowych $\Xi_i = \{0,1\}$,
- 2) $\Psi = \Psi_1 \times \Psi_2 \times \dots \times \Psi_k$ jest zbiorem wyjść również w postaci iloczynu kartezjańskiego zbiorów $\Psi_i = \{0,1\}$,
- 3) ϕ - funkcja wejściowo-wyjściowa.

Uporządkowana l-tka:

$$(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l)$$

nazywana będzie dalej wejściem systemu logicznego kombinacyjnego. Zmienną $\xi_i \in \Xi_i$ dla $i = 1, 2, \dots, l$ nazywa się i-tą współrzędną wejścia, a liczbę l ilością zmiennych wejściowych.

Uporządkowana k-tka:

$$(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k)$$

nazywana będzie wyjściem systemu logicznego kombinacyjnego. Zmienną $\psi_i \in \Psi_i$ dla $i = 1, 2, \dots, k$ nazywa się i-tą współrzędną wyjścia, a liczbę k ilością zmiennych wyjściowych.

Funkcja wejściowo-wyjściowa systemu o k wyjściach jest zdefiniowana całkowicie przez podanie k funkcji logicznych l zmiennych w postaci:

$$\psi_i = \psi_i(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l) \quad (5.21)$$

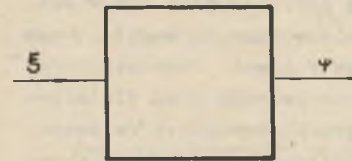
dla $i = 1, 2, \dots, k$.

Funkcję logiczną l zmiennych nazywa się tutaj przyporządkowanie każdemu elementowi zbioru Ξ jednego i tylko jednego elementu zbioru $\Psi_i = \{0,1\}$.

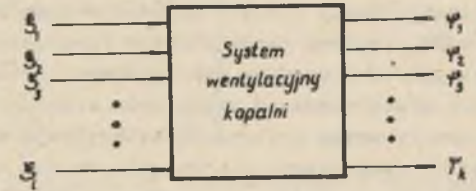
5.6. Identyfikacja struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjnego

Językiem struktury systemu wentylacyjnego, podobnie jak w przypadku sieci wentylacyjnej, jest model graficzny, czyli graficzne przedstawienie pewnej własności systemu. Postępowanie polegające na wyznaczaniu struktury funkcjonalnej systemu na podstawie jego zachowania nazywać będziemy identyfikacją struktury systemu. Nie prowadzi ono do jednoznacznego rozwiązania, gdyż takie samo zachowanie mogą wykazywać systemy o różnej strukturze. Powszechnie znanym modelem graficznym systemu jest schemat blokowy, gdyż można nim posługiwać się w sposób intuicyjny [27, 104]. Najprostsza jego postacią jest blok podstawowy (rys. 5.6) z jednym wejściem i jednym wyjściem oraz zachodzącą między nimi zależnością funkcjonalną. W przypadku wielu wejść i wyjść błąk przedstawia dzięki nim tylko to, co

jest istotne w danym problemie, lecz następuje ogromna komplikacja zależności funkcjonalnych, które pozostają nieznanne (rys. 5.7). System przedstawiony jest więc w postaci "czarnej skrzynki" i posiada charakter wielowymiarowego przetwornika dopasowującego zbiór wejść do zbioru pożądanych wyjść. Relację wejściowo-wyjściową można wyspecyfikować drogą uzasadnionego logicznie podziału bloku, wyobrażającego cały system, na mniejsze i prostsze bloki składowe. Określa się wejścia i wyjścia poszczególnych bloków składowych dopasowując je do zbioru wejść - wyjść całego systemu. Najlepiej, jeśli tworzymy wtedy bloki proste o charakterze przetworników jednofunkcyjnych.



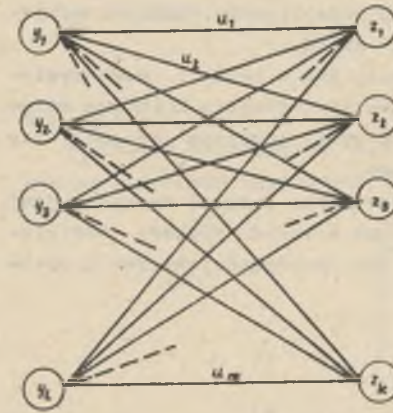
Rys. 5.6. Blok podstawowy systemu z wejściem i wyjściem tworzonymi przez pojedyncze zmiennne



Rys. 5.7. Blok systemu logicznego kombinacyjnego z wejściem i wyjściem tworzonymi przez dowolne liczby zmiennych wejściowych i wyjściowych stanowiący model systemu wentylacyjnego kopalni

W systemie wentylacyjnym kopalni powyższy sposób identyfikacji struktury funkcjonalnej okazuje się ogromnie złożony.

Przyjmijmy uproszczenie, że wystarczające będzie wyspecyfikowanie tylko bezpośrednich powiązań między poszczególnymi wejściami a wyjściami.



Rys. 5.8. $G = \langle Y U Z, U \rangle$ odwzorowujący wszystkie możliwe powiązania między wejściem a wyjściem systemu wentylacyjnego traktowanego jako system logiczny kombinacyjny

Nie będziemy poszukiwać dodatkowych powiązań wewnętrznych. Przedstawienie modelu systemu wentylacyjnego w postaci "czarnej skrzynki" jest równoznaczne z odwzorowaniem wszystkich możliwych powiązań między jego wejściami a wyjściami. Można je interpretować w postaci grafu zorientowanego $G = \langle Y U Z, U \rangle$, w którym podzbiorek wierzchołków $Y \subset X$ odpowiadają elementy scharakteryzowane określonymi zmiennymi binarnymi wejściowymi, a zbiorowi wierzchołków $Z \subset X$ - wyjściowymi (rys. 5.8). Jeśli liczby l oraz k oznaczają ilości tych zmiennych, to $|X U Y| = l + k$. Liczba wierzchołków w utworzonym grafie G nie może być

większa od liczby elementów wyróżnionych w systemie wentylacyjnym, lecz może przewyższać liczbę bocznicy w sieci, z którymi związane elementy systemu. Na przykład w niektórych bocznicach może być umieszczona ściana (odbiór), a także sama wentylacyjna służąca do regulacji przepływu i podlegająca uszkodzeniom.

Zbiorowi luków U grafu G odpowiada zbiór powiązań funkcjonalnych. Problem identyfikacji struktury funkcjonalnej, przy sformułowanych wcześniej założeniach, sprowadza się do uściślenia postaci grafu $G = \langle Y \cup Z, U \rangle$, w sensie szczególności odwzorowania związków funkcjonalnych istniejących między elementami wejścia i wyjścia systemu. Uściślenie postaci grafu reprezentującego strukturę funkcjonalną przeprowadzić można w sposób bezpośredni poprzez eksperyment w rzeczywistej sieci wentylacyjnej lub w sposób pośredni poprzez wykorzystanie obliczeń symulacyjnych na modelu. W tym celu przeprowadzamy obliczenia rozprężu powietrza w sieci wentylacyjnej rozpatrywanego systemu wentylacyjnego dla stanu normalnego oraz dla przypadków uszkodzenia poszczególnych tam wentylacyjnych, wentylatorów pomocniczych, wyrobisk i innych zawodnych elementów systemu. Wszystkie pozostałe elementy sieci wentylacyjnej, nie wyróżnione w charakterze elementów systemu, uznajemy za niezawodne. Proponowana metoda jest więc pewną odmianą metody prób granicznych znaną w diagnostyce.

Obliczenia przeprowadzamy dla pojedynczych przypadków uszkodzeń, zgodnie z założeniem poszukiwania bezpośrednich powiązań między elementami uszkodzalnymi a odbiorami powietrza. Może jednak się zdarzyć przypadkowo, że sprawdzenie za pomocą symulowanych uszkodzeń pojedynczych elementów y_j nie wykazuje ich powiązania z odbiorem z_j , natomiast sprawdzenie uszkodzenia łącznego elementów y_1, y_j wykazuje powyższe powiązanie. Przypadki takich powiązań zostaną pominięte, gdyż sprawdzenie ich jest nieekonomiczne przy przyjęciu metody podwójnego przeliczenia rozprężu powietrza dla oceny skutków każdego wymuszenia w sieci.

Mimo że metoda jest trywialna - Petit [114] już w 1900 r. wykorzystywał podwójne przeliczenie dla znalezienia skutków otwarcia krótkiego spięcia - trudno ją zastąpić inną, bardziej efektywną. Obecnie stosuje się tylko niezmiernie szybkie środki obliczeniowe.

Dla przeprowadzenia obliczeń rozprężu powietrza w sieci wentylacyjnej, symulujących uszkodzenia elementów wchodzących w skład systemu wentylacyjnego, będziemy stosować następującą tablicę zmiennych logicznych wejściowych:

$$\begin{matrix} \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \dots \xi_1 & = & (0 & 1 & 1 & \dots & 1) \\ \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \dots \xi_1 & = & (1 & 0 & 1 & \dots & 1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3 \dots \xi_1 & = & (1 & 1 & 1 & \dots & 0) \end{matrix} \quad (5.22)$$

Każdy wiersz tablicy (5.22) jest argumentem funkcji logicznej 1 zmiennych. Stała logiczna 0 symbolizuje przyjęcie przez element $y \in Y$ wartości parametru jego charakterystyki odpowiadającej uszkodzeniu - zgodnie z określeniem (5.1).

W wyniku obliczeń rozprężu powietrza w sieci wentylacyjnej dla zmiennych kolejno sygnałów wejściowych uzyskujemy macierz wydatków \check{V}_{lk} dla k odbiorów:

$$\check{V}_{lk} = \begin{bmatrix} \check{V}_{11} & \check{V}_{12} & \dots & \check{V}_{1k} \\ \check{V}_{21} & \check{V}_{22} & \dots & \check{V}_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \check{V}_{l1} & \check{V}_{l2} & & \check{V}_{lk} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Wartości wydatków w wierszach macierzy \check{V}_{lk} porównujemy z wartościami określającymi przedziały dopuszczalne dla zapotrzebowania powietrza w poszczególnych odbiorach:

$$[\check{V}_{1/min}, \check{V}_{1/max}] \cdot [\check{V}_{2/min}, \check{V}_{2/max}] \cdot \dots \cdot [\check{V}_{k/min}, \check{V}_{k/max}] \quad (5.24)$$

Przedziały powyższe charakteryzują obszar pracy systemu będący wielościanem wypukłym w 2 - k-wymiarowej przestrzeni wektorowej.

Współrzędne wektore wydatków spełniać powinny warunki:

$$\check{V}_j - \check{V}_{j/min} > 0 \quad (5.25)$$

$$\check{V}_{j/max} - \check{V}_j > 0 \quad (5.26)$$

dla $j = 1, 2, \dots, k$.

Zgodnie z określeniem (5.19) macierz wydatków może być zastąpiona macierzą zmiennych logicznych wyjściowych:

$$Y = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \dots & \psi_{1k} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \dots & \psi_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \psi_{l1} & \psi_{l2} & \dots & \psi_{lk} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Wiersze macierzy są wyjściami systemu (traktowanego jako system logiczny kombinacyjny) i tworzą zbiór wyjść Y^o . Uzyskana tablicę zmiennych logicznych nazywać będziemy zatem macierzą wyjścia Ψ . Macierz Ψ można z kolei

interpretować jako binarną macierz incydencji $A(H)$ opisującą hipergraf $H = \langle Y, \{E_j\} \rangle$, dla $j = 1, 2, \dots, k$, jeśli zdefiniujemy ją w następującej formie:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } y_i \in E_j \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (5.28)$$

Definicja powyższa jest odmienne od zawartych w monografiach [82], [166], gdyż zamieniono w niej rolę liczb 0 i 1.

Zgodnie z określeniem (5.28) 1 wierszom macierzy Ψ odpowiada 1 wierzchołków $y \in Y$ hipergrafu H , natomiast k kolumnom odpowiada k hiperkrawędzi tego hipergrafu. Ponieważ zbiór wejść \bar{H} można jednoznacznie przyporządkować elementom uszkodzalnym, to tym samym jest im jednoznacznie przyporządkowany zbiór wyjść Ψ , czyli 1 wierszy macierzy Ψ odpowiada 1 elementom uszkodzalnym $y \in Y$. Kolumnom macierzy Ψ odpowiadać będą natomiast odbiory $z \in Z$, przez co hiperkrawędzie $\{E_j\}$ możemy ponumerować liczbami etykietującymi elementy z_1, z_2, \dots, z_k zbioru odbiorów Z .

Tak więc relacje między wierzchołkami a hiperkrawędziami są poszukiwanymi powiązaniem w systemie wentylacyjnym tworzącymi jego strukturę funkcjonalną. Aby wyraźniej ujawnić powiązania strukturalne, identyfikujące je hipergraf H przekształcamy w graf liniowy $K(H)$, wykorzystując formę pośrednią grafu blokowego $B(H)$. Centrami uzyskanych drzew-gwiazd będą wierzchołki $z \in Z$. Macierz Ψ można będzie więc ostatecznie interpretować jako specjalną macierz połączeń M zastosowaną już przez Engla i współautorów [48] dla zapisu relacji połączeń między zwykłymi wierzchołkami grafu (tzw. multilace graph) a wierzchołkami tworzącymi "pajęki" (spiders). W naszym przypadku "pajęki" Engla nazwalibyśmy ogólnie drzewami-gwiazdami z centrami $z \in Z$. Elementy macierzy M , nazywanej dalej macierzą uszkodzeń odbiorów, definiujemy w następującej postaci:

$$m_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{jeśli wierzchołek } y_i \text{ jest połączony krawędzią z centrum } z_j \\ 1 & \text{jeśli brak połączenia} \end{cases} \quad (5.29)$$

Rola stałych logicznych 0,1 została więc także zamieniona. Mamy zatem:

		Z			
		z_1	z_2	\dots	z_k
$M =$	y_1	ψ_{11}	ψ_{12}	\dots	ψ_{1k}
	y_2	ψ_{21}	ψ_{22}	\dots	ψ_{2k}
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	y_l	ψ_{l1}	ψ_{l2}	\dots	ψ_{lk}

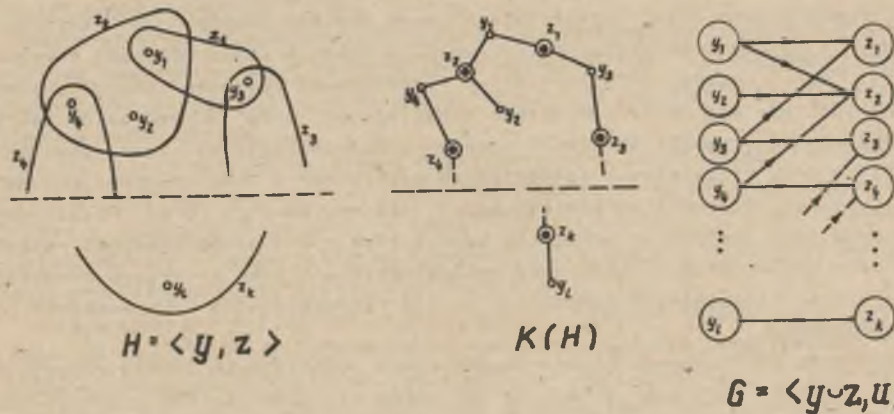
(5.30)

Przynależność wierzchołków grafu $K(H)$ do dwóch różnych podzbiorów $Y, Z \subset X$ oraz istnienie relacji tworzącej macierz uszkodzeń M świadczy o jego specjalnych właściwościach polegających między innymi na tym, że relacje połączeń realizowane są tylko dla pary wierzchołków $\langle y, z \rangle \in U_\phi$, natomiast nie są realizowane połączenia $\langle y_1, y_2 \rangle$ i $\langle z_1, z_2 \rangle$. Zatem graf $K(H)$ można przekształcić do grafu dwudzielnego Königa $G = \langle Y \cup Z, U_\phi \rangle$.

Ponieważ wierzchołki $y \in Y$ odpowiadają wejściom systemu, a wierzchołki $z \in Z$ - wyjściom, to można nadać krawędziom $\langle x_1, z_j \rangle$ orientację od wierzchołka x_1 do wierzchołka z_j . Stosując macierz uszkodzeń M zamiast macierzy Ψ można wprost konstruować graf $K(H)$ bez potrzeby wcześniejszego analizowania hipergrafu H .

Dla przykładu niech macierz uszkodzeń odbiorów ma postać:

	z_1	z_2	z_3	z_4	\dots	z_k
y_1	0	0	1	1	\dots	1
y_2	1	0	1	1	\dots	1
y_3	0	1	0	1	\dots	1
y_4	1	0	1	0	\dots	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
y_l	1	1	1	1	\dots	1



Rys. 5.9. Ilustracja przekształcenia hipergrafu $H = \langle Y, Z \rangle$, utworzonego na podstawie macierzy wyjście systemu, do grafu dwudzielnego $G = \langle Y \cup Z, U_\phi \rangle$ odwzorowującego istotne powiązania funkcjonalne w systemie wentylacyjnym

Kolejne przekształcenia hipergrafu $H = \langle Y, \{E_j\} \rangle$ w odpowiadający wprost macierzy M graf $K(H) = \langle Y, \{z_j\} \rangle$ oraz graf dwudzielny $G = \langle Y \cup Z, U_\phi \rangle$ przedstawia rys. 5.9. Uzyskany graf dwudzielny G jest uściśleniem postaci grafu $G = \langle Y \cup Z, U \rangle$ odwzorowującego wszystkie możliwe połączenia między elementami wejściowymi i wyjściowymi w "czarnej skrzynce" (rys. 5.8). Znalezione zostały bowiem podzbiór $U_\phi \subset U$ reprezentujący krawędzie zorientowane identyfikujące relację wejściowo-wyjściową ϕ .

5.7. Identyfikacja struktury niezawodnościowej systemu wentylacyjnego kopalni

Zagadnieniami niezawodności przewietrzania kopalń zajmowało się już wielu autorów. Sieć wentylacyjną traktowano na ogół jako sieć przepływową, a niezawodność przewietrzania wiązano z pracą bezuszkodzeniową dróg doprowadzania i odprowadzania powietrza z odbiorów. Na przykład Wasserman [152, 153] określa niezawodność poszczególnych elementów sieci wentylacyjnej z punktu widzenia ich zdolności do przesyłania powietrza w ilości określonej w projekcie. Rozpatruje więc przede wszystkim niezawodność prądów powietrza - powiązanych wzajemnie w strukturze przepływowej sieci wentylacyjnej. Korzyścią powyższego podejścia jest łatwe przechodzenie do oceny efektywności systemu wentylacyjnego, chociaż zastosowane kryterium - uzyskanie pożądanego wydatku wszystkich prądów w sieci - nie jest teoretycznie uzasadnione i wymaga posługiwania się wątpliwymi wskaźnikami niezawodności (np. przyjmującymi wartości powyżej jedności).

Podobne podejście reprezentuje w swych pracach Uszakow [150]. Natomiast Rogow i Bankin w artykułach [120, 121], a także w obszerniejszej monografii [122], przyjęli jako kryterium uszkodzenia systemu wentylacyjnego przesunięcie się wektora wydatków niezależnych poza dopuszczalny zakres. Podstawą konstrukcji struktury (grafu) niezawodnościowej jest ustalenie zbioru dróg niezależnych istniejących w strukturze topologicznej sieci wentylacyjnej. Widać to wyraźnie w pracy [122, s. 84-85]. Graf niezawodnościowy jest tam wprost schematem kanonicznym z przyporządkowanymi wskaźnikami niezawodności, bądź może być potraktowany jako struktura równoległych dróg niezależnych powstałych po ich rozszczępieniu w strukturze topologicznej.

Z prac poświęconych niezawodności sieci technicznych innego rodzaju [5, 65, 78, 108, 130, 144] wiemy, że ich ocena niezawodnościowa poprzez rozszczępienie dróg i uzyskiwanie struktury szeregowo-równoległej jest pesymistyczna. W teorii niezawodności metoda powyższa znana jest jako metoda minimalnych dróg i minimalnych przekrojów [6, 68, 84]. Im ważniejsze miejsce zajmuje element w sieci wentylacyjnej, tym większa liczba dróg doprowadzających powietrze do odbiorów jest wyłączona w przypadku jego uszkodzenia. Wielokrotne uwzględnianie niektórych elementów sieci w jej

strukturze niezawodnościowej jest zdaniem niektórych autorów [154] niewłaściwe. W nowszej pracy dotyczącej sieci wentylacyjnych Bankin [12] wnosi poprawki do konstrukcji grafu niezawodnościowego. Graf ten nie pokrywa się już dokładnie ze strukturą topologiczną sieci, gdyż przy wyborze dróg niezależnych mogą być uwzględniane elementy wpływające na uszkodzenie odbioru wchodzącego w skład drogi niezależnej, a nie związane z nim szeregowo w strukturze topologicznej.

Najkorzystniej jest związać z konkretnym odbiorem powietrza te wszystkie elementy, których uszkodzenie wpływa na uszkodzenie odbioru - niezależnie w jakiej strukturze topologicznej pozostają one w sieci. Coj [40, s. 126-138] wykazał, że bocznice ze zmiennymi oporami ze względu na charakter oddziaływania na inne bocznice, będące odbiorami powietrza, czyli tzw. robocze, mogą być podzielone na "równoległe" i "szeregowo" do nich. Część z bocznic "równoległych" i "szeregowych" może być zaliczona do obydwóch typów z racji nieznacznego oddziaływania na wydatek odbiorów. Łatwo więc widzieć, że uszkodzenie bocznic wyraźnie "równoległych" bądź "szeregowych" może nieść uszkodzenie odbioru z powodu zaniżenia lub zawyżenia jego wydatku. Pod względem niezawodnościowym bocznice uszkodzalne obydwóch typów będą tworzyć z sobą również pewną strukturę.

Podobne podejście znajdujemy w niektórych pracach dotyczących innych rodzajów sieci, na przykład u Billingtona i Grovera [19] w zakresie sieci energetycznych, u Siudy i współautorów [127] w zakresie sieci elektrycznych lub u Abramowa [3] w odniesieniu do sieci hydraulicznych. Również to właśnie podejście przyjęto w niniejszej pracy przedstawiając metodę analizy niezawodnościowej systemu wentylacyjnego przy wykorzystaniu jego struktury funkcjonalnej, a nie topologicznej. Rozszerzono równocześnie wyniki uzyskane w pracy [53].

Rolę struktury funkcjonalnej (grafów funkcjonowania) systemów w diagnostyce systemów wykazał na przykład Dubrowski [47], a Kaszewski [69] przedstawił metodę wyznaczania tej struktury dla ogólnie zdefiniowanego obiektu technicznego.

Model niezawodnościowy stacji elektroenergetycznych na podstawie modelu funkcjonalnego tworzył też Matla [98]. Stosował metodę logiczno-analityczną z wykorzystaniem funkcji logicznej zapisywanej w postaci dysjunkcji wszystkich minimalnych dróg sprawności systemu lub koniunkcji wszystkich minimalnych przekrojów niesprawności.

Prezentowana w niniejszej pracy koncepcja badania modelu sieci wentylacyjnej zestawami sygnałów wejściowych i porównywanie generowanych sygnałów wyjściowych z sygnałami sieci sprawnej nawiązuje też do prac Komorowskiego [78, 79] i Zamojskiego [162] dotyczących sieci logicznych, Varżapetiana i Korsunowa [151] z zakresu automatów, Łatinskiego i współautorów [96] z zakresu układów radiolokacyjnych czy Gaskarowa i współautorów [54] zajmujących się niezawodnością aparatury radioelektronicznej. Interesującą koncepcję przedstawili też Oprzędkiewicz i Węsierski [106]. Pra-

ce ty były inspiracją dla przyjęcia podobnych założeń umożliwiających i-dentyfikację struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjnego, a więc znajdywania jego relacji systemotwórczej [4].

Dla ustalenia struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjnego przyjmowaliśmy jako sygnały wejściowe tylko uszkodzenia pojedyncze elementów. Założenie to można osłabić dopuszczając również możliwość wystąpienia sygnału będącego sumą sygnałów uszkodzeń pojedynczych. Weźmy dla przykładu system o strukturze funkcjonalnej przedstawionej na rys. 5.10a. Prawdopodobieństwo stanu niezawodnościowego elementów jest znane, a zbiory wejść i wyjść systemu charakteryzuje poniższa tabela:

wejścia	wyjścia	realizacja celu
(1,1)	(1,1,1)	1 (tak)
(0,1)	(1,0,0)	1 (tak)
(1,0)	(0,1,0)	1 (tak)
(0,0)	(0,0,0)	0 (nie)

Zakładamy, że cel systemu jest zrealizowany, jeżeli chociaż jeden odbiór jest zaspokojony, tzn. $\exists j, \psi_j = 1$.

Zachodzi to dla wejść: (1,1), (0,1) i (1,0). Funkcje logiczne struktury niezawodnościowej systemu, opisująca realizację celu systemu, ma więc postać:

$$\phi(\xi_1, \xi_2) = \xi_1 \vee \xi_2 \quad (5.36)$$

Ponieważ wyraża ona dysjunkcję, zatem po zarytmetyzowaniu uzyskujemy:

$$\phi(\xi_1, \xi_2) = \xi_1 + \xi_2 - \xi_1 \cdot \xi_2 \quad (5.36)$$

Ponieważ

$$\xi_1 + \xi_2 - \xi_1 \cdot \xi_2 = 1 - (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) \quad (5.37)$$

to zarytmetyzowana funkcja logiczna struktury będzie miała również postać:

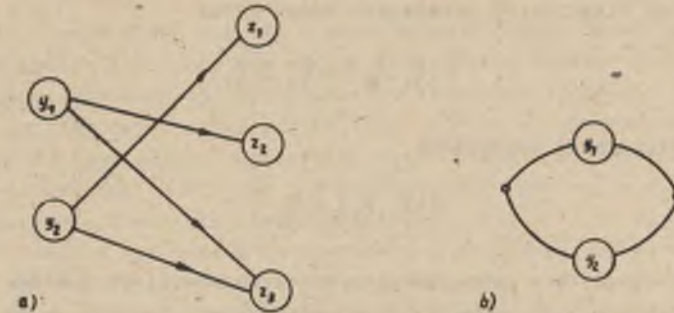
$$\phi(\xi_1, \xi_2) = 1 - (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) \quad (5.38)$$

Funkcja ta wyraża więc równoległą strukturę niezawodnościową systemu, dla której w ogólnym przypadku:

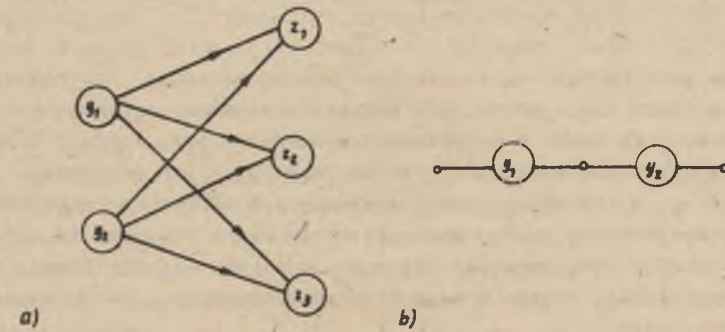
$$\phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \xi_i) \quad (5.39)$$

System opisywany strukturą równoległą jest uszkodzony wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie jego elementy są uszkodzone. Po zamianie zdarzeń we wzorze (5.39) na ich prawdopodobieństwa obliczyć możemy prawdopodobieństwo realizacji celu systemu.

Dla rozpatrywanego systemu o strukturze funkcjonalnej jak na rys. 5.10a zidentyfikowana struktura niezawodnościowa ma postać prostego połączenia równoległego elementów y_1, y_2 (rys. 5.10b).



Rys. 5.10. Przykładowa struktura funkcjonalna systemu wentylacyjnego (a) oraz odpowiadająca jej równoległa struktura niezawodnościowa (b)



Rys. 5.11. Przykładowa struktura funkcjonalna systemu wentylacyjnego (a) oraz odpowiadająca jej szeregowa struktura niezawodnościowa (b)

Z kolei rozpatrzmy system jak na rys. 5.11a, w którym dla tej samej liczby elementów zidentyfikowano inną strukturę funkcjonalną. Niech zbiory wejść i wyjść systemu oraz stany realizacji celu charakteryzuje poniższa tabela:

wejścia	wyjścia	realizacja celu
(1,1)	(1,1,1)	1 (tak)
(0,1)	(0,0,0)	0 (nie)
(1,0)	(0,0,0)	0 (nie)
(0,0)	(0,0,0)	0 (nie)

Realizacja celu systemu nastąpi tylko dla wejścia (1,1). Funkcja logiczna struktury ma więc postać wyrażającą koniunkcję:

$$\phi(\xi_1, \xi_2) = \xi_1 \wedge \xi_2 \quad (5.40)$$

Po zarytmetyzowaniu uzyskujemy

$$\phi(\xi_1, \xi_2) = \xi_1 \cdot \xi_2 \quad (5.41)$$

Funkcja ta wyraża szeregową strukturę niezawodnościową systemu (rys. 5.11b). W ogólnym przypadku dla 1 elementów systemu funkcja ϕ ma postać:

$$\phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1) = \prod_{i=1}^1 \xi_i \quad (5.42)$$

System wentylacyjny o strukturze niezawodnościowej szeregowej jest sprawny wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie elementy są sprawne.

Zauważmy, że gdyby w przykładach systemów z rys. 5.10a i 5.11a przyjąć realizację celu systemu w postaci zaspokojenia wszystkich odbiorów tzn. $\forall j, \psi_j=1$, to dla obydwóch systemów ich struktura niezawodnościowa byłaby strukturą szeregową. Wyciągamy stąd ważny wniosek, że zidentyfikowanie struktury funkcjonalnej nie wystarcza dla identyfikacji struktury niezawodnościowej. Trzeba bowiem również sprecyzować, kiedy system jest w stanie zdadności.

Zakłada się najczęściej dla systemów technicznych, że funkcja logiczna struktury jest funkcją koherentną (monotoniczną), tzn. spełniającą następujące warunki [68]:

- (1) $\phi(1,1,\dots,1) = 1$
- (2) $\phi(0,0,0,\dots,0) = 0$ (5.34)
- (3) $\phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi'_1, \dots, \xi_1) > \phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1, \dots, \xi_1)$ jeśli $\xi'_1 > \xi_1$

Ostatni warunek oznacza, że uszkodzenie elementu nie poprawia jego niezawodności.

Dla struktur koherentnych wspomniane wcześniej struktury: szeregową i równoległą są przypadkami granicznymi. Zatem dla wszystkich struktur koherentnych jest [64]:

$$\prod_{i=1}^1 \xi_i \leq \phi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1) \leq 1 - \prod_{i=1}^1 (1 - \xi_i) \quad (5.44)$$

Tak więc niezawodność systemu o strukturze złożonej nie jest gorsze niż w przypadkach struktury szeregowej i nie jest lepsza niż w przypadkach struktury równoległej. Aby wyznaczyć strukturę złożoną, celowe jest dzielenie systemu na mniejsze części, dla których struktura jest typu szeregowego bądź równoległego. Najłatwiej zatem rozpatrywać niezawodność realizacji celu systemu ze względu na poszczególne odbiory $z \in Z$.

Dla utworzenia struktury niezawodnościowej systemu ze względu na odbiór z_j korzysta się bowiem bezpośrednio z ustalonej już struktury funkcjonalnej systemu. Znajduje się w niej te elementy uszkodzalne, stanowiące wejścia systemu, które powiązane są zależnością funkcjonalną z odbiorem z_j . Utworzona struktura niezawodnościowa takiego podsystemu będzie zawsze typu szeregowego. Na przykład, na rys. 5.10a elementy y_1 i y_2 muszą tworzyć strukturę szeregową, jeśli analizuje się niezawodność funkcjonowania odbioru z_3 . Struktury równoległe można byłoby wykryć po zastosowaniu bardziej złożonych sygnałów wejściowych testujących funkcjonowanie systemu.

Tworzenie struktur niezawodnościowych dla całego systemu wentylacyjnego - o ile nie są to omówione wcześniej przypadki graniczne - nie jest możliwe, albowiem nieuzasadnione jest przyjmowanie tylko dwóch stanów systemu. Przy większej liczbie stanów systemu, powstających ze względu na jego wyjście, pojęcie niezawodności funkcjonowania traci na znaczeniu na korzyść pojęcia efektywności funkcjonowania systemu. Przy ocenie efektywności funkcjonowania systemu wentylacyjnego struktura funkcjonalna również będzie pomocna.

6. LICZBOWE MIARY STRUKTURY SIECI I SYSTEMU WENTYLACYJNEGO

6.1. Równoważność struktur sieciowych

W geometrii dwie figury uważa się za równoważne, jeśli mają identyczne właściwości geometryczne, co znaczy, że pomiędzy ich elementami można określić wzajemnie jednoznaczne przyporządkowanie i gdy elementy jednej figury spełniają jakiś związek, to również odpowiednie elementy drugiej figury związek ten spełniają.

Podobnie określić można równoważność dwóch grafów, nazywając je izomorficznymi, jeśli mają one identyczne właściwości topologiczne. W teorii grafów istotne są bowiem te właściwości geometryczne, do ujęcia których nie potrzeba prostej i płaszczyzny, lecz wystarcza istnienie ciągłości między punktami figury [46, 63]. Właściwości topologiczne mogą być scharakteryzowane za pomocą jednego tylko pojęcia geometrycznego: bliskości punktu względem zbioru - którego zachowanie jest właśnie podstawą istnienia ciągłości. Izomorfizm grafów jest więc ogólniejszym pojęciem homeomorfizmu, który określony jest tylko w odniesieniu do bliskości punktu względem zbioru [22, 56].

Dwa grafy G_1 i G_2 nazywane są wzajemnie izomorficznymi, jeśli zachodzi wzajemnie jednoznaczna odpowiedniość między ich wierzchołkami oraz między ich krawędziami przy zachowaniu relacji incydencji. Grafy izomorficzne muszą mieć równą liczbę wierzchołków o danym stopniu, równą liczbę krawędzi, lecz są to jedynie warunki konieczne. Nie ma też efektywnego kryterium stwierdzenia izomorfizmu. Odpowiedniość między wierzchołkami można określić ustalając graf G_1 i przedstawiając wierzchołki grafu G_2 dla sprawdzenia identyczności macierzy połączeń. Proces wymaga jednak $n!$ przedstawień, a więc jest bardzo nieefektywny [46]. Dlatego chętniej stosuje się algorytmy oparte na kodowaniu grafu poprzez znajdowanie zbioru niezmienników, tj. liczb identycznych dla wszystkich grafów izomorficznych. Niezmiennikami izomorfizmu są zwykle:

- n - liczba wierzchołków grafu,
- m - liczba krawędzi grafu,
- Q - stopień grafu,
- φ - liczba cyklowatyczna grafu,
- k - liczba składowych grafu,
- h - stopień spójności grafu.

Powższe niezmienniki nie tworzą przewidywalnie zbioru zupełnego, lecz identyczność wielu z nich czyni prawdopodobnym izomorfizm analizowanych grafów.

Izomorfizm grafów odwzorowujących sieci wentylacyjne w formie schematów kanonicznych wyraża w pełni równoważność struktur topologicznych tych sieci. Jednakże w praktyce przypadek izomorfizmu dwóch sieci wentylacyjnych jest mało prawdopodobny. Wynika to z dużej liczby bocznic sieci, a tym samym ogromnej różnorodności tworzonych struktur. Możliwy jest natomiast izomorfizm podsieci wentylacyjnych, zwłaszcza o niewielkich rozmiarach. Na tym fakcie opiera się wykorzystywanie schematów kanonicznych w dydaktyce, gdyż zakłada się z góry, że dowolnie przyjęty schemat kanoniczny jest izomorficzny z pewną częścią schematu kanonicznego rzeczywistej kopalni.

6.2. Podobieństwo topologiczne sieci wentylacyjnych

Trudność z identycznością struktur sieci wentylacyjnych pokonać można poprzez wprowadzenie pojęcia ich podobieństwa topologicznego. Korolski i Potiemkin [1, 81] wprowadzili podobieństwo dwóch sieci wentylacyjnych według trzeciej sieci.

Tak więc dwie sieci S_1 i S_2 dane w postaci grafów G_1 i G_2 z wyróżnionymi biegunami s, t są podobne topologicznie między sobą według sieci dwubiegunowej S_3 , jeśli dla ich podgrafów częściowych $g_1 \in G_1$ i $g_2 \in G_2$ oraz grafu G_3 sieci S_3 zachodzi homeomorfizm:

$$g_1 \stackrel{\text{top}}{=} g_2 \stackrel{\text{top}}{=} G_3 \quad (6.1)$$

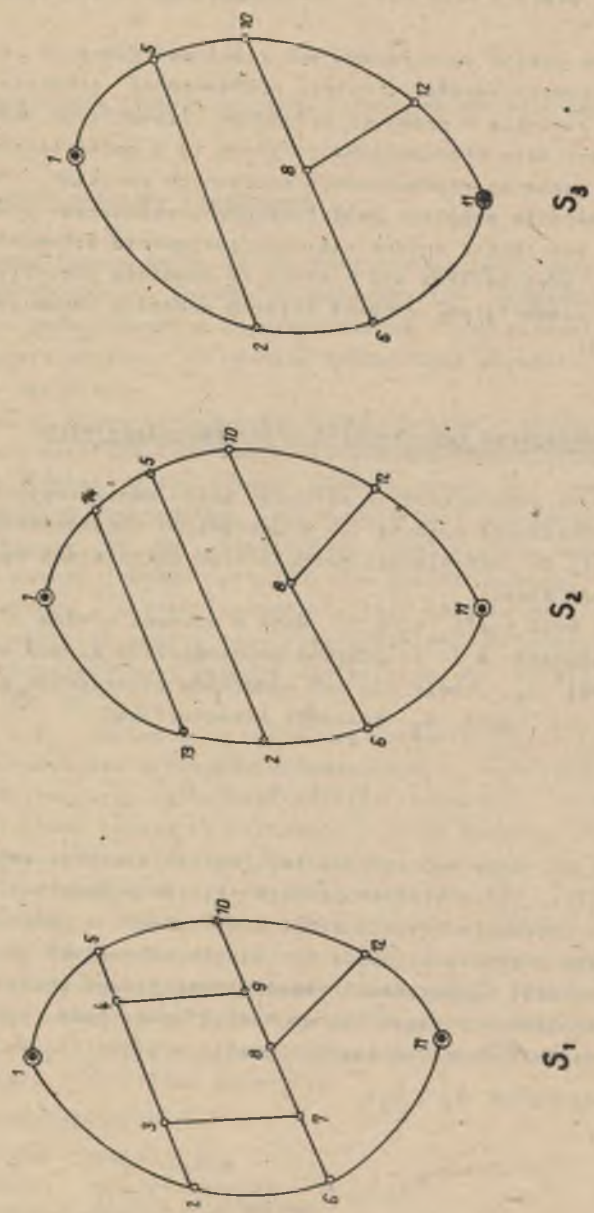
Sieci S_1 i S_2 mogą być podobne topologicznie między sobą względem wielu sieci $S_3^1, S_3^2, \dots, S_3^k$, z których co najmniej jedna będzie siecią maksymalną. Korolski i Potiemkin nazwali takie podobieństwo - głównym.

Na przykład, dla sieci S_1 i S_2 danych schematami kanonicznymi jak na rys. 6.1 zachodzi podobieństwo topologiczne główne według sieci S_3 . Podobieństwo topologiczne sieci scharakteryzowane może być współczynnikiem δ_{S_1, S_2} będącym stosunkiem liczby bocznic w sieci S_3 do większej z liczb bocznic w sieciach S_1 i S_2 :

$$\delta_{S_1, S_2} = \frac{m(S_3)}{\max\{m(S_1), m(S_2)\}} \quad (6.2)$$

Dla sieci z rys. 6.1 mamy:

$$\delta_{S_1, S_2} = \frac{11}{\max(14, 17)} = \frac{11}{17} = 0.65$$



Rys. 6.1. Podobieństwo topologiczne główne sieci S_1 i S_2 według sieci S_3

łatwo zauważyć, że gdy $\delta_{S_1, S_2} = 1$, to sieci S_1 i S_2 mają równoważne struktury. Ideę Korolskiego-Potiemkina, dotyczącą sposobu definiowania podobieństwa topologicznego sieci wentylacyjnych, rozszerzyć można na sieci wentylacyjne rozmyte.

Zastosujmy operację α -obcięcia [45] zbioru rozmytego, przekształcającą zbiór rozmyty w zbiór konwencjonalny, do obcięcia relacji rozmytej \tilde{P} . Tak więc α -obcięciem relacji rozmytej \tilde{P} będzie relacja binarna:

$$P_\alpha = \{ \langle x, u, y \rangle, \mu_P(x, u, y) \geq \alpha \} \quad \text{dla} \quad \alpha \in [0, 1]$$

$$P_\alpha = \begin{cases} 1 & \text{dla } \mu_P(x, u, y) \geq \alpha \\ 0 & \text{dla } \mu_P(x, u, y) < \alpha \end{cases} \quad (6.3)$$

α -obcięciem grafu rozmytego \tilde{G} nazywać się będzie graf nierozmyty G_α z α -obciętą relacją P_α :

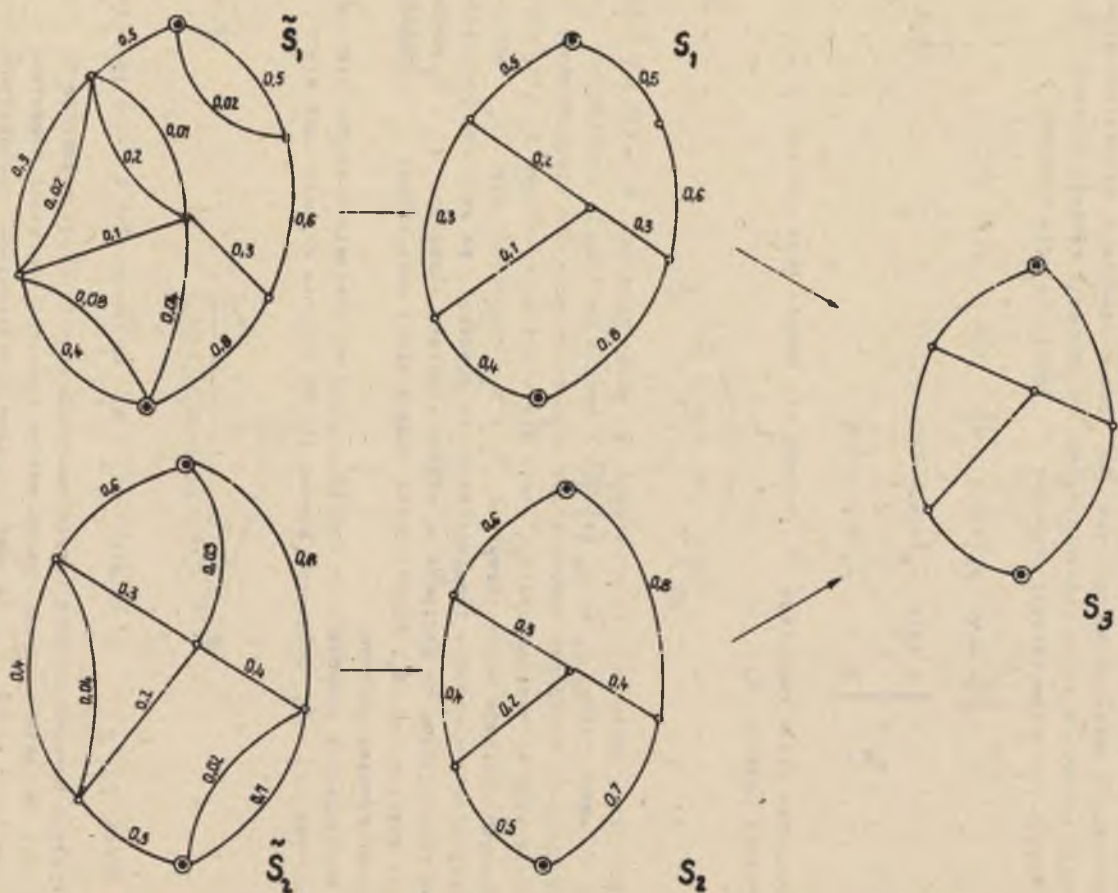
$$G_\alpha = \langle X, U, P_\alpha \rangle \quad (6.4)$$

Dobierzmy takie α , że utworzona z sieci rozmytej $\tilde{S}_1 = \langle \tilde{P}, \{a\}, \{h\} \rangle$ sieć konwencjonalna $S_1 = \langle G_\alpha, \{a\}, \{h\} \rangle$ będzie spójna i posiadająca te same bieguny. Powtórzmy powyższą operację α -obcięcia dla sieci rozmytej \tilde{S}_2 tworząc sieć konwencjonalną S_2 . Jeśli dla sieci nierozmytych S_1 i S_2 stawiących obcięcie sieci rozmytych \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 znajdziemy sieć S_k , według której będą one podobne topologicznie, to powiemy, że istnieje podobieństwo topologiczne na poziomie α między sieciami rozmytymi \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 według sieci nierozmytej S_k . Podobieństwo według sieci maksymalnej S_k będziemy nazywać również głównym.

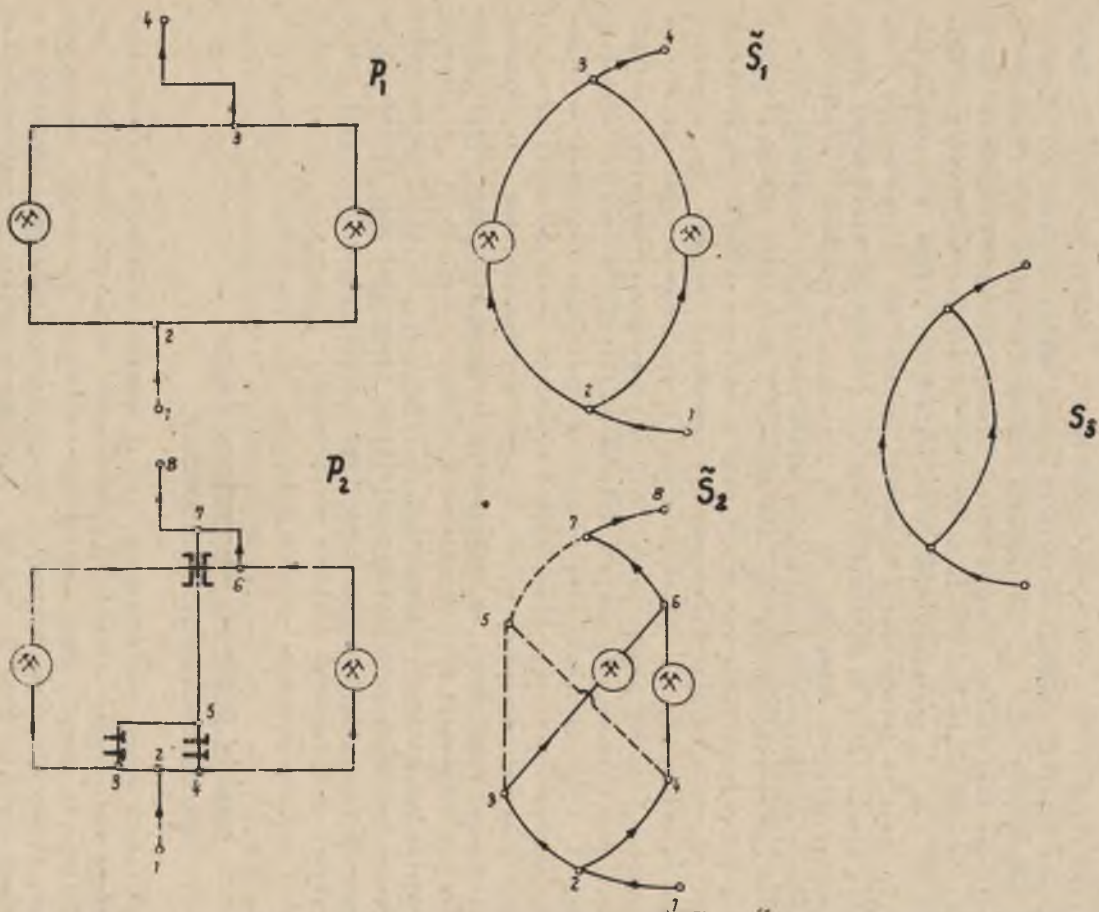
Współczynnik podobieństwa topologicznego na poziomie α między sieciami rozmytymi \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 obliczamy biorąc liczby bocznic w obcięciach sieci:

$$\delta_{\tilde{S}_1, \tilde{S}_2} |_\alpha = \frac{m(S_k)}{\max\{m(S_1), m(S_2)\}} \quad (6.5)$$

Jeśli $\delta_{\tilde{S}_1, \tilde{S}_2} |_\alpha = 1$, to sieci S_1 i S_2 są równoważne i można je przekształcić homeomorficznie (przez usunięcie ewentualnych półwęzłów) do sieci S_k . W takim przypadku podobieństwo topologiczne sieci rozmytych \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 względem sieci S_k nazywać będziemy podobieństwem topologicznym pełnym na poziomie α . Jest to najbardziej interesujący przypadek podobieństwa topologicznego sieci rozmytych, bo określający względną identyczność struktur mimo ich różnego obrazu geometrycznego.



Rys. 6.2. Podobieństwo topologiczne pełne na poziomie $\alpha = 0,1$ sieci rozmytych \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 według sieci S_3



Rys. 6.3. Podobieństwo topologiczne pełne sieci wentylacyjnych \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 powstałych dla dwu różnych roz-
 kładów P_1 i P_2 pola eksploatacyjnego, określone na poziomie prądów nie tamowanych (tworzących sieć S_3)

Na rys. 6.2, dla zilustrowania omawianej metody, przedstawiono dwie sieci rozmyte \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 w pełni podobne topologicznie na poziomie $\alpha = 0,1$ według sieci S_3 . Liczby opisujące bocznicę sieci są stopniami przynależności μ_p . Z kolei rys. 6.3 przedstawia rozcinkę pola eksploatacyjnego w wersji P_1 i P_2 . W wersji P_2 zastosowano modyfikację polegającą na wykonaniu pochylni 4 - 5 - 7, oraz chodnika 3 - 5 umożliwiającą przeprowadzenie lokalnej rewersji wentylacji według metody Kukuczki [7]. Wyrobiska dodatkowe w polu P_2 są tamowane śluzami wentylacyjnymi i powietrze przepływać nimi powinno w bardzo małej ilości. Schematy kanoniczne wyrobisk i prądów powietrza w polach P_1 i P_2 interpretujemy jako sieci rozmyte \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 z graficzną funkcją przynależności prądów (w przypadku sieci \tilde{S}_1 jest to interpretacja formalna). Ustalmy $\alpha = 1$ jako poziom obciążenia sieci, czyli na poziomie prądów nie tamowanych. Stwierdzamy łatwo, że między sieciami rozmytymi \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 istnieje na poziomie prądów nie tamowanych podobieństwo topologiczne pełne według sieci normalnej S_3 .

Analizując sieć rozmytą \tilde{S}_2 dla pola P_2 określamy charakter prądów 3-6 i 4-6 przewietrzających rejony jako przekątny, a mimo to struktura sieci \tilde{S}_2 jest na poziomie prądów nie tamowanych podobna do struktury sieci normalnej \tilde{S}_1 . W warunkach nieawaryjnego przewietrzania pola P_2 nie są istotne ucieczki powietrza wyrobiskami otamowanymi, natomiast normalność prądów ułatwia kierowanie rozplywem powietrza. W takich warunkach sieci \tilde{S}_1 i \tilde{S}_2 posiadają więc identyczne właściwości. Natomiast w sytuacjach awaryjnych (pożar) poszczególne wyrobiska wykorzystywane są w inny sposób i struktura rozmyta sieci \tilde{S}_2 musi być rozpatrywana na niższym poziomie α . Widać więc, że porównywanie struktur sieci wentylacyjnych powinno być dokonywane przy określonym α -obciążeniu sieci, czyli z pomocą schematów kanonicznych nierozmytych $G_\alpha = \langle X, U, \alpha \rangle$. Dla porównywania struktur podobnych topologicznie należałoby także użyć miar liczbowych będących funkcją niezmienników izomorfizmu i wyrażających konkretne cechy struktury na określonym poziomie odwzorowania.

6.3. Przegląd liczbowych miar struktury sieci lub systemu znanych w literaturze

W teorii sieci transportowych, teorii systemów i układów technicznych stosuje się terminy: złożoność, koherentność, spójność, zwartość w odniesieniu do specyficznych właściwości struktur sieciowych utworzonych przez elementy systemu lub układu. Definicje tych terminów spotykamy w pracach wielu autorów [9, 36, 61], rzadziej natomiast przedstawiane są próby liczbowej oceny reprezentowanych przez nie cech struktury sieciowej.

Wśród spotykanych w literaturze liczbowych miar struktury systemu lub sieci jedne są funkcjami tylko parametrów struktury, np. liczby wierzchołków, liczby krawędzi lub rzędu wierzchołków, drugie zaś zawierają jeszcze

parametry obciążenia węzłów lub krawędzi, tzn. na zbiorze wierzchołków lub krawędzi określona jest dodatkowo funkcja przyjmująca wartości rzeczywiste i jest ona uwzględniana w ocenie. Przykładowo, w podanej już w 1965 r. przez Litwiniszyna [95] miarze korespondencji między elementami zbioru obciążeniem bocznicę sieci wentylacyjnej jest liczba pracujących ludzi. Opracowany w ten sposób wskaźnik może być uważany za miarę prawidłowości struktury sieci wentylacyjnej ze względu na zmniejszenie wtórnych zagrożeń pożarowych. Również w pracy Trutwina [148] dodatkowym obciążeniem bocznic jest wartość prawdopodobieństwa pojawienia się pożaru. Wołnisty i Kuricyn [156] jako obciążenie krawędzi przyjmują wartość prawdopodobieństwa realizacji tej krawędzi w strukturze sieciowej.

Zajmiemy się dalej miarami nie zawierającymi parametrów obciążenia elementów struktury.

Najczęściej złożoność systemu ocenia się na podstawie liczby możliwych powiązań między jego n elementami, która dla przypadku powiązań jednokierunkowych wynosi:

$$L_1 = n(n - 1) \tag{6.6}$$

a dla przykładu powiązań dwukierunkowych

$$L_2 = \frac{n(n - 1)}{2} \tag{6.7}$$

Ocenę taką przytocza Mynarski [104] i można ją też znaleźć u innych autorów, np. u Ilina [64].

Nie we wszystkich systemach sieciowych wzrost liczby elementów idzie w parze z rozbudową i skomplikowaniem powiązań między elementami. Stąd ocena złożoności oparta na liczbie możliwych powiązań może słabo charakteryzować strukturę systemu.

Buslenko w monografii [27] proponuje oceniać złożoność systemu poprzez złożoność jego elementów i powiązań między elementami wg następującego wzoru:

$$S = 1 + c \cdot a \sum_{i=1}^r s_i k_i \tag{6.8}$$

gdzie:

- s_i - złożoność elementu systemu,
- k_i - liczba elementów i -tego typu,
- a - względna liczba realizowanych powiązań między elementami,
- c - współczynnik uwzględniający złożoność powiązań w systemie w porównaniu do złożoności elementów.

Wartość α oblicza się ze wzoru:

$$\alpha = \frac{m}{L_1} = \frac{m}{n(n-1)} \quad (6.8a)$$

gdzie:

- m - faktyczna liczba powiązań zrealizowanych w systemie.
- L_1 - możliwa (maksymalna) liczba powiązań dla danej liczby n elementów.

Slepych, Redczenko i Wjaznikowcem [120] jako miarę złożoności sieci wentylacyjnej zaproponowali wskaźnik:

$$K = \frac{m}{\gamma} \quad (6.9)$$

gdzie:

- m - liczba bocznic w sieci,
- γ - liczba niezależnych cykli w sieci (liczba cyklomatyczna).

W oparciu o powyższy wskaźnik autorzy [120] zaproponowali też następujący podział sieci na trzy klasy:

- klasa I: $1 < K \leq 2$ sieci proste
- klasa II: $2 < K \leq 2,5$ sieci złożone
- klasa III: $K > 2,5$ sieci bardzo złożone.

Coj [40] za miarę złożoności topologicznej sieci wentylacyjnej uznaje wartość średnią d_{sr} rzędu węzłów w sieci. Wiadomo bowiem z teorii grafów [46], że dla dowolnego grafu zawierającego m krawędzi oraz n wierzchołków rzędu $d(x_i)$ zachodzi związek:

$$\sum_{i=1}^n d(x_i) = 2m \quad (6.10)$$

skąd

$$d_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n d(x_i)}{n} = \frac{2m}{n} \quad (6.11)$$

Śladowski [20], omawiając metody planowania sieciowego, scharakteryzował stopień powiązania układu sieciowego przez wskaźnik β określony stosunkiem:

$$\beta = \frac{m}{n} \quad (6.12)$$

Zdaniem Steenbrinka [132] wskaźnik β zaproponował w 1963 r. Kansky [67]. Wartość wskaźnika β umożliwia wg [20] zaliczanie sieci do jednej z trzech następujących klas:

- klasa I: $1 < \beta \leq 1,2$ sieci o układzie prostym
- klasa II: $1,2 < \beta \leq 1,5$ sieci o układzie złożonym
- klasa III: $1,5 < \beta \leq 2,0$ sieci o układzie skomplikowanym

Wnioskiem ze słynnego wzoru Eulera o wielościanach jest stwierdzenie, że w prostym spójnym grafie planarnym zawierającym n wierzchołków oraz m krawędzi ($m > 2$) zachodzi następująca nierówność [46, s. 134]:

$$m \leq 3n - 6 \quad (6.13)$$

Jak podaje Steenbrink [132], nierówność (6.13) wykorzystali Garrison i Marble [55] do skonstruowania dwóch wskaźników struktury grafu α i β służących do mierzenia spójności grafu.

Wskaźnik α określono jako stosunek aktualnej liczby cykli grafu planarnego do ich maksymalnej możliwej liczby:

$$\alpha = \frac{m - n + 1}{(3n - 6) - n + 1} = \frac{m - n + 1}{2n - 5} \quad (6.14)$$

Wskaźnik β jest natomiast stosunkiem aktualnej liczby krawędzi do maksymalnej liczby krawędzi w grafie płaskim:

$$\beta = \frac{m}{3n - 6} \quad (6.15)$$

Jak więc widać, wskaźniki zawierają warunek (6.13) jako równość, co może budzić poważne zastrzeżenia. Steenbrink podaje [132] również informację, że Garrison i Marble przystosowali wskaźniki α , β do sieci nieplanarnych.

6.4. Miara złożoności struktury

Rozpatrzmy skończony, spójny graf (multigraf) bez pęteli $G = \langle X, U, P \rangle$, którego wszystkie wierzchołki są rzędu wyższego niż dwa, tzn. incydentne są z co najmniej trzema krawędziami. Niech grafy G_1, G_2, \dots, G_n , których liczby cyklomatyczne $\gamma(G_1) = \gamma(G_2) = \dots = \gamma(G_n) = K$, tworzą K -klasę grafów. Grafem bardzo prostym względem klasy K nazwiemy multigraf posiadający dokładnie dwa wierzchołki połączone $(K + 1)$ -krotnie krawędziami. Graf z klasy K , nie będący grafem bardzo prostym, nazwiemy grafem złożonym względem klasy K .

Lemat 1

Jeżeli grafy G_1, G_2, \dots, G_n tworzą K-klasę grafów, to największe wartości mocy zbiorów X i U

$$(n_{\max} = \max |X_i|, m_{\max} = \max |U_i| \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n)$$

posiada graf $G_1 \in K$ -klasy regularny rzędu trzy (tzw. graf kubiczny).

Lemat 2 (O.Ore [107])

Jeżeli graf G posiada $n = |X|$ wierzchołków i $m = |U|$ krawędzi, a jego wierzchołki są rzędów $d(x_1), d(x_2), \dots, d(x_n)$, to:

$$\sum_{i=1}^n d(x_i) = 2m \quad (6.16)$$

Twierdzenie

Dla każdej liczby $\varphi(G) > 1$ można skonstruować skończony, spójny graf bez pęteli, w którym moce zbiorów X i U będą przyjmowały największe wartości w danej klasie $K = \varphi(G)$ równe:

$$n_{\max} = 2 [\varphi(G) - 1] \quad (6.17)$$

$$m_{\max} = 3 [\varphi(G) - 1] \quad (6.18)$$

D o w ó d

Na podstawie lematu 1 graf regularny rzędu trzy posiada maksymalną liczbę wierzchołków i krawędzi ze wszystkich grafów danej klasy K . Na podstawie lematu 2 dla regularnego grafu rzędu trzy zachodzi związek:

$$3 n_{\max} = 2 m_{\max} \quad (6.19)$$

skąd

$$n_{\max} = \frac{2}{3} m_{\max}; \quad m_{\max} = \frac{3}{2} n_{\max} \quad (6.19a)$$

Wykorzystując związki (6.19a) i wzór na liczbę cyklomatyczną

$$\varphi(G) = m - n + 1 \quad (6.20)$$

uzyskuje się:

$$n_{\max} = \frac{2}{3} [\varphi(G) + n_{\max} - 1]$$

$$n_{\max} = 2 [\varphi(G) - 1]$$

$$m_{\max} = \frac{2}{3} [m_{\max} - \varphi(G) + 1]$$

$$m_{\max} = 3 [\varphi(G) - 1] \quad \text{c.n.u.}$$

Niech s oznacza różnicę między liczbą wierzchołków n w dowolnym grafie G a liczbą wierzchołków n_{\min} w grafie bardzo prostym G_0 , dla $G, G_0 \in K$. Maksymalna różnica s_{\max} między liczbą wierzchołków n_{\max} a liczbą wierzchołków n_{\min} wystąpi w grafie regularnym rzędu $r = 3$.

Jako liczbę \mathcal{G} złożoności grafu G względem klasy K grafów przyjmujemy się wartość stosunku:

$$\frac{s}{s_{\max}} = \mathcal{G}(G) \quad (6.21)$$

Na podstawie określenia różnicy s , definicji grafu bardzo prostego i twierdzenia udowodnionego wyżej wynikają związki:

$$s = n - n_{\min}; \quad s_{\max} = n_{\max} - n_{\min}$$

$$n_{\min} = 2; \quad n_{\max} = 2 [\varphi(G) - 1]$$

Wtedy, dla grafów o liczbie cyklomatycznej $\varphi(G) > 2$, prawdziwe będzie przekształcenie stosunku (6.21) określającego liczbę złożoności $\mathcal{G}(G)$:

$$\mathcal{G}(G) = \frac{s}{s_{\max}} = \frac{n - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}} = \frac{n - 2}{2\varphi(G) - 4} \quad (6.22)$$

Oznaczając przez $\varphi(G)$ różnicę $n - 1$, nazywaną stopniem grafu, otrzymuje się ostateczną postać liczby złożoności grafu [136, 138]:

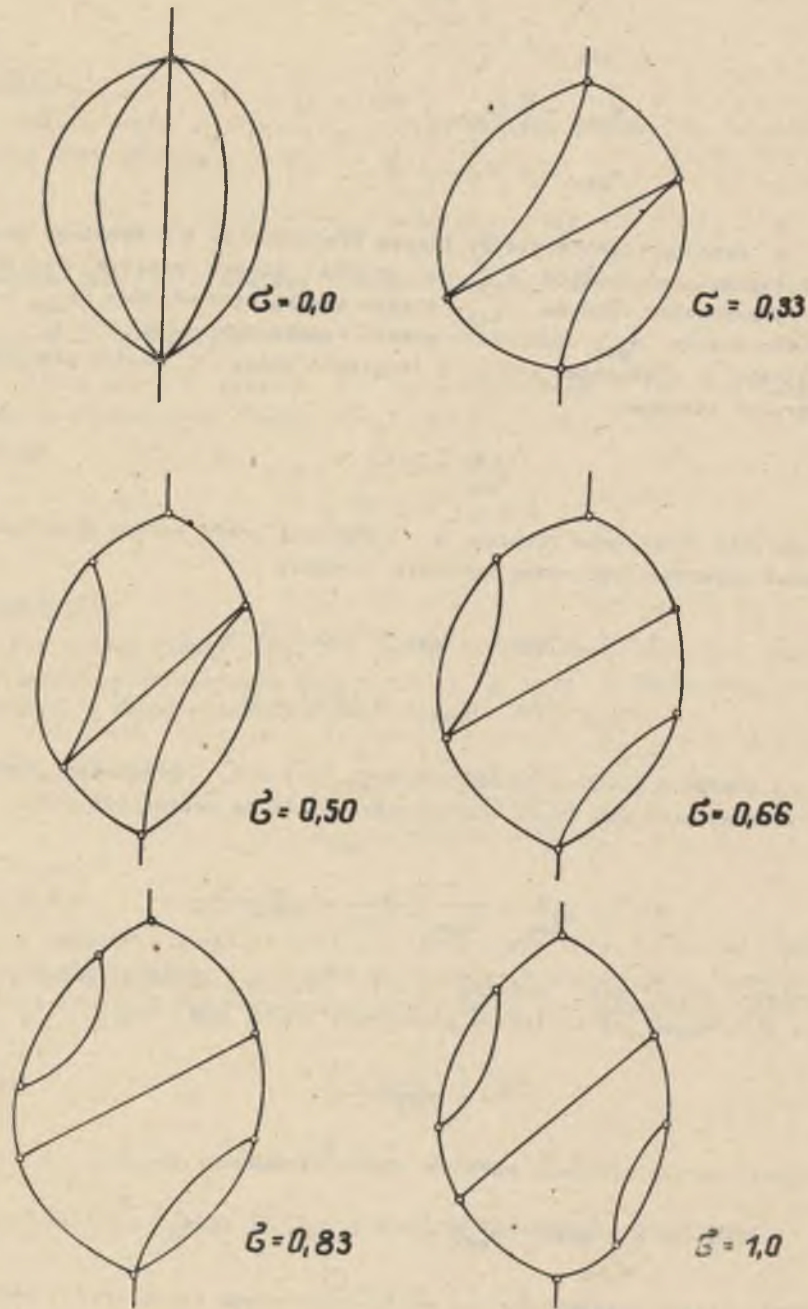
$$\mathcal{G}(G) = \frac{\varphi(G) - 1}{2\varphi(G) - 4} \quad (6.23)$$

Dla grafu bardzo prostego wartość liczby złożoności wynosi:

$$\mathcal{G}(G_0) = 0 \quad \text{gdyż } n_{\max} = n = n_{\min} \quad \text{i} \quad \varphi(G_0) = 1$$

Podobnie licząc otrzymujemy dla grafu regularnego rzędu $r=3$ wartość $\mathcal{G}(G) = 1$.

Dla wszystkich innych grafów liczba złożoności jest zawarta w przedziale $(0,1)$.



Rys. 6.4. Przykłady sieci o różnej liczbie złożoności G a stałej liczbie cykli niezależnych

Wprowadzona liczba złożoności grafu może być zastosowana do oceny złożoności struktury sieci wentylacyjnej. Sieci idealnej wentylacyjnie odpowiada liczba złożoności równa zero. Sieci o najwyższym rozgałęzieniu (przy danej ilości miejsc pracy przewietrzanych niezależnie) posiadają liczbę złożoności równą jeden. Ilustracją graficzną wzrostu złożoności sieci jest powiększanie się w niej liczby węzłów przy stałej liczbie cykli niezależnych (rys. 6.4). Klasy sieci rzeczywistych o równej dokładnie liczbie złożoności nie są liczne i dlatego należy podzielić przedział wartości liczb G na szersze podprzedziały. Ponieważ liczba złożoności zależy liniowo od liczby węzłów, proponujemy podział sieci na następujące klasy złożoności:

klasa I: $0 < G < 0,25$	sieci o strukturze bardzo prostej,
klasa II: $0,25 < G < 0,50$	sieci o strukturze prostej,
klasa III: $0,50 < G < 0,75$	sieci o strukturze złożonej,
klasa IV: $0,75 < G < 1,0$	sieci o strukturze bardzo złożonej.

6.5. Miara zwartości struktury

Dla wyodrębnionego z sieci, w postaci podgrafu częściowego, dowolnego cyklu bocznic można zawsze skonstruować gwiazdę dualną względem niego. Podobnie dla dowolnie wyodrębnionej gwiazdy istnieje dualny cykl. Dla sieci płaskich można utworzyć w ten sposób nową dualną sieć.

Istnienie związków dualnych w sieci uzasadnia rozpatrywanie innej właściwości struktury sieci, związanej ze wzrostem liczby bocznic przy stałej liczbie węzłów.

W pracy [140] zaproponowano więc miarę \bar{z} tzw. zwartości struktury odniesioną do sieci utworzonych przez grafy spójne bez pętli i krawędzi wielokrotnych (unigrafy). W grafie spójnym niektóre wierzchołki x_i, x_j mogą być bowiem połączone z sobą nie tylko łańcuchem L_{ij} o określonej długości, ale również krawędzią (x_i, x_j) . Dodatkowe bezpośrednie połączenia między wierzchołkami grafu polepszają więc jego spójność i taką polepszoną spójność nazywamy zwartością grafu (w pracy [36] użyto pojęcia zwartości w podanym sensie w odniesieniu do systemu).

Niech unigrafy spójne $\{G_i\}$ dla $i = 1, \dots, k$ tworzą klasę S , jeśli liczby ich wierzchołków $|X_i| = n_i$ są równe. Unigraf pełny G_p o $n = n_1$ wierzchołkach jest wtedy najbardziej zwarty ze wszystkich unigrafów spójnych klasy S , gdyż zawiera maksymalną liczbę m_{max} połączeń (krawędzi) między wierzchołkami.

Wynosi ona:

$$m_{max} = \frac{(n-1)n}{2} \quad (6.24)$$

Odłączenie w unigrafie $G_1 \in S$ krawędzi (x_i, x_j) bez naruszenia jego spójności zmniejsza zwartość unigrafu. W granicznym wypadku osiągnię się postać unigrafu, w którym odłączenie dowolnej następnej krawędzi naruszy jego spójność. Właściwość tę posiada każdy graf-drzewo G_T . Graf-drzewo $G_T \in S$ cechuje się więc najmniejszą zwartością spośród wszystkich unigrafów klasy S .

Liczba krawędzi m_{\min} w grafie drzewie G_T o $n = n_1$ wierzchołkach jest minimalna w stosunku do wszystkich unigrafów $G_1 \in S$ i wynosi:

$$m_{\min} = n - 1 \quad (6.25)$$

łatwo więc zauważyć, że dla każdego unigrafu spójnego $G_1 \in S$ liczba krawędzi m zawarta jest w przedziale $[m_{\min}, m_{\max}]$.

Utworzymy nową liczbę $\bar{z}(G)$ w postaci stosunku odpowiednich różnic liczb m_{\min}, m_{\max} :

$$\bar{z}(G) = \frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \quad (6.26)$$

Liczba $\bar{z}(G)$ normuje dodatkową liczbę krawędzi w danym unigrafie spójnym $G_1 \in S$ w stosunku do dodatkowej liczby krawędzi w unigrafie pełnym $G_p \in S$.

Uwzględniając w (6.26) związki (6.24) i (6.25) otrzymujemy:

$$\bar{z}(G) = \frac{2(m - n + 1)}{(n - 1)(n - 2)} \quad (6.27)$$

a więc postać określającą liczbę $\bar{z}(G)$ w zależności od liczby krawędzi i wierzchołków w unigrafie, bez potrzeby rozpatrywania klas S . Liczbę $\bar{z}(G)$ proponujemy mierzyć zwartość dowolnego unigrafu spójnego $G = \langle X, R \rangle$.

Określimy w tym celu zbiór możliwych wartości liczb $\bar{z}(G)$. W unigrafie minimalnie zwartym, jakim jest graf-drzewo G_T , liczba krawędzi $m = m_{\min}$. Uzyskujemy wtedy z (6.26):

$$\bar{z}(G_T) = \frac{m_{\min} - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} = 0 \quad (6.28)$$

W unigrafie maksymalnie zwartym, jakim jest graf pełny G_p , liczba krawędzi $m = m_{\max}$. Uzyskujemy wtedy z (6.26):

$$\bar{z}(G_p) = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} = 1 \quad (6.29)$$

Dla wszystkich innych unigrafów spójnych G liczby zwartości $\bar{z}(G)$ są liczbami wymiernymi z przedziału $(0, 1)$.

Uwzględniając wzory na liczbę cyklomatyczną $\varphi(G)$ oraz stopień $Q(G)$ grafu otrzymujemy inny równoważny wzór obliczeniowy na liczbę zwartości:

$$\bar{z}(G) = \frac{2 \varphi(G)}{Q(G) [Q(G) - 1]} \quad (6.30)$$

Zarówno ze wzoru (6.27), jak i wzoru (6.30) widać, że liczba zwartości unigrafu zależy bardzo silnie od liczby wierzchołków. Jest to konsekwencja wzoru (6.24), według którego liczba krawędzi w unigrafie pełnym zależy od kwadratu liczby wierzchołków.

Wprowadzona liczba zwartości $\bar{z}(G)$ unigrafu spójnego może znaleźć zastosowanie dla różnorodnej oceny struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej, jeśli odpowiadający jej schemat kanoniczny lub fragment schematu stanowi unigraf spójny.

Niektóre bocznicze w sieciach rzeczywistych tworzą połączenia równoległe (odpowiadające multigrafom), ale można je dla celów obliczeniowych usunąć ze schematu bez większej szkody dla wyniku.

Zauważmy też, że nigdzie nie nałożyliśmy ograniczeń na rząd $d(x_i)$ wierzchołków unigrafu, a więc wprowadzenie do sieci półwęzłów jest dozwolone. Liczba zwartości \bar{z} zależy liniowo od liczby możliwych cykli niezależnych w sieci, co uzasadnia podział sieci na następujące klasy zwartości.:

- klasa I: $0 < \bar{z} < 0,25$ sieci o strukturze bardzo słabo zwartej,
- klasa II: $0,25 < \bar{z} < 0,50$ sieci o strukturze słabo zwartej,
- klasa III: $0,50 < \bar{z} < 0,75$ sieci o strukturze silnie zwartej,
- klasa IV: $0,75 < \bar{z} < 1,0$ sieci o strukturze bardzo silnie zwartej.

Im większa liczba węzłów w sieci, tym trudniej o zrealizowanie struktury silnie zwartej.

6.6. Związek gęstości grafu z miarami liczbowymi struktury sieciowej

Rozpatrzmy graf $G = \langle X, R \rangle$, gdzie X jest zbiorem wierzchołków, a R dowolną relacją binarną symetryczną określoną na zbiorze X . Rozmiarem takiego grafu nazywana jest para uporządkowana liczb (n, m) , gdzie $n = |X|$ oraz $m = |R_X|$. Klasę grafów $\{G_1\}$ o rozmiarze (n, m) oznaczamy będziemy przez $G(n, m)$, przyjmując także to samo oznaczenie dla dowolnego jej przedstawiciela.

Gęstością $g(G)$ grafu $G(n, m)$ nazywa się w teorii grafów stosunek liczby krawędzi $m(G)$ tego grafu do liczby krawędzi $m(G_p)$ w odpowiadającym mu grafie pełnym $G_p(n, m_{\max})$:

$$g(G) = \frac{m(G)}{m(G_p)} \quad (6.31)$$

Naturalnie $0 \leq g(G) \leq 1$, a wartości graniczne odpowiadają grafom: zero-
wemu i pełnemu. Uwzględniając znaną relację (np. w postaci wzoru (6.7))
między liczbami krawędzi i wierzchołków odniesioną do grafu pełnego bez
krawędzi wielokrotnych:

$$m(G_p) = \frac{n(n-1)}{2} \quad (6.32)$$

można przekształcić wzór do postaci:

$$g(G) = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (6.33)$$

Zauważmy, że tak określona gęstość grafu odpowiada dokładnie współ-
czynnikowi "a" we wzorze (6.8) Buslenki. Liczba $n-1$ określa rząd wierz-
chołków w grafie pełnym, który zawsze jest także grafem regularnym. Oznaczą-
my więc rząd wierzchołków w grafie pełnym przez d_{max} dla podkreślenia,
że posiada on wartość maksymalną. Po przekształceniu (6.33) uzyskujemy:

$$g(G) \cdot d_{max} = \frac{2m}{n} \quad (6.34)$$

Porównanie wzorów (6.11) oraz (6.34) daje natychmiast związek między
gęstością grafu a topologiczną złożonością sieci $d_{\acute{e}r}$ zdefiniowaną przez
Coja:

$$g(G) = \frac{d_{\acute{e}r}}{d_{max}} \quad (6.35)$$

Istnieje również podobieństwo wzoru (6.34) ze wzorem (6.12) określającym
wskaznik powiązania β w układach sieciowych.

Rozwijając dalej pojęcie gęstości grafu można próbować zdefiniować gę-
stość specjalnych podzbiorów grafu. Otóż w każdym grafie spójnym $G(n,m)$
można wyróżnić dendryt $G_T(n, m_T)$ będący drzewem. Liczba krawędzi odrzu-
canych (tzn. cięciw) z grafu dla utworzenia jego dendrytu wynosi:

$$m_A = m - m_T \quad (6.36)$$

i równa jest liczbie cyklopatycznej.

Zbiór cięciw grafu tworzy tzw. antydendryt $G_A(n_A, m_A)$, będący również
grafem - ale niekoniecznie spójnym.

Gęstością antydendrytową unigrafu spójnego bez pęteli $G(n,m)$ nazwiemy
stosunek liczby cięciw $m_A(G)$ tego unigrafu do liczby cięciw $m_A(G_p)$ w
odpowiadającym mu unigrafie pełnym $G_p(n, m_{max})$:

$$g_A(G) = \frac{m_A(G)}{m_A(G_p)} \quad (6.37)$$

Jeśli rozważany graf $G(n,m)$ jest drzewem, to liczba jego cięciw
 $m_A(G) = 0$, a więc również gęstość $g_A(G) = 0$. Dla wszystkich innych uni-
grafów spójnych $0 < g_A(G) \leq 1$. Podstawiając obliczoną liczbę cięciw
(6.36) do (6.37) otrzymujemy również:

$$g_A(G) = \frac{n - n_{min}}{n_{max} - n_{min}} \quad (6.38)$$

Określona wzorem (6.26) liczba zwartości sieci jest więc dokładnie gę-
stością antydendrytową unigrafu spójnego bez pęteli.

W grafach tworzących sieci transportowe istotne są (z punktu widzenia
funkcjonalnego) wierzchołki co najmniej trzeciego rzędu. Wierzchołki rze-
du wyższego można zastąpić odpowiednim zbiorem wierzchołków rze-
dniego i dodatkowymi krawędziami [136, 138]. Rozpatrzmy więc dalej grafy
(unigrafy lub multigrafy) spójne bez pęteli zawierające n wierzchołków co
najmniej trzeciego rzędu. W każdym takim grafie $G(n,m)$ można również wy-
różnić dendryt $G_T(n, m_T)$.

Niech grafy $G(n,m)$ tworzą specjalne obszerne klasy stosownie do war-
tości ich liczby cyklopatycznej ψ . W każdej utworzonej klasie (dla $\psi =$
 $= const$) graf regularny rzędu trzy $G_{R3}(n_{max}, m)$ zawiera największą liczbę
wierzchołków, wszystkie trzeciego rzędu. Może być więc grafem porównaw-
czym w stosunku do innych grafów wspomnianej klasy, podobnie jak graf peł-
ny w stosunku do grafów o równej liczbie wierzchołków (a tym samym i stop-
niu ψ grafu).

Gęstością dendrytową grafu $G(n,m)$ nazwiemy stosunek liczby krawędzi
 $m_T(G)$ wyróżnionego dendrytu $G_T(n, m_T)$ do liczby krawędzi $m_T(G_{R3})$ w od-
powiadającym mu grafie regularnym rzędu trzy $G_{R3}(n_{max}, m)$:

$$g'_T(G) = \frac{m_T(G)}{m_T(G_{R3})} \quad (6.39)$$

Zauważmy, że $g'_T(G) \neq 0$, gdyż najmniejszym spójnym grafem z wierzchołka-
mi rzędu trzy i bez pęteli jest graf $G(2,3)$ z dwoma wierzchołkami i trze-
ma krawędziami.

Dendrytem grafu $G(2,3)$ jest graf jednokrawędziowy $G_T(2,1)$. Aby uzy-
skać zmienność gęstości dendrytowej grafu w przedziale (0,1), modyfikuje-
my wzór (6.39) do postaci:

$$g_T(G) = \frac{m_T(G) - 1}{m_T(G_{R3}) - 1} \quad (6.40)$$

Liczba krawędzi dendrytu grafu związana jest z liczbą jego wierzchołków wzorem wynikającym z właściwości grafu-drzewa:

$$m_T = n - 1$$

Uzyskujemy więc inną postać wzoru na gęstość dendrytową grafu:

$$g_T(G) = \frac{n - 2}{n_{max} - 2} \quad (6.42)$$

Liczbę 2 we wzorze (6.42) można interpretować jako liczbę wierzchołków $n_{min} = 2$ grafu $G(n_{min}, k)$ (dla $k \geq 3$), który wcześniej nazwano grafem bardzo prostym.

Uzyskujemy ostatecznie postać:

$$g_T(G) = \frac{n - n_{min}}{n_{max} - n_{min}} \quad (6.43)$$

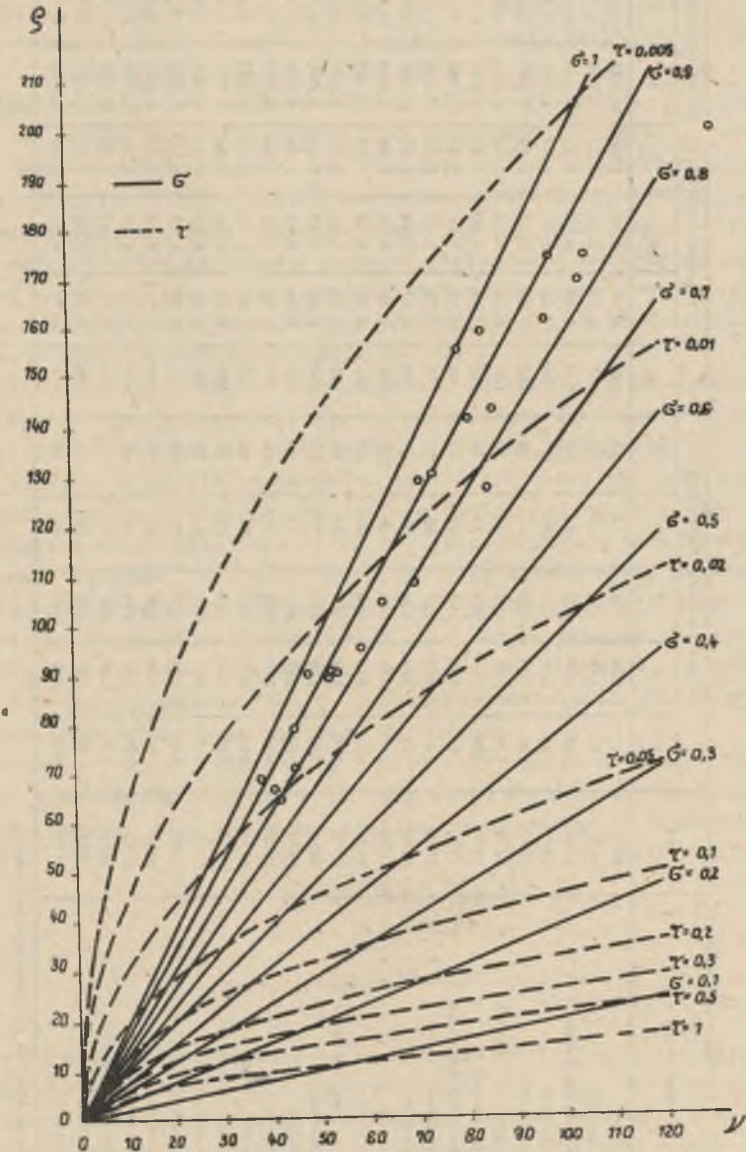
Określona wzorem (6.22) liczba złożoności struktury sieci jest więc dokładnie gęstością dendrytową grafu tworzącego daną strukturę sieci. Wprowadzone do teorii wentylacji liczby złożoności G i zwartości τ dla oceny struktury sieci wentylacyjnej, a także wskaźniki zaproponowane przez innych autorów znajdują w świetle przeprowadzonych rozważań ogólniejsze teoretyczne uzasadnienie.

6.7. Związki między złożonością i zwartością struktury sieci wentylacyjnej

Liczba złożoności G określona wzorem (6.23) związana jest z liczbą zwartości τ (6.30) poprzez dwa parametry sieci: liczbę cyklotyczną φ oraz stopień sieci Q . Parametry te charakteryzują sieć wentylacyjną pod względem możliwości wyboru rodzaju zagadnienia sieciowego, wyboru metody obliczeń a nawet oceny szybkości obliczeń [137]. Może więc posiadać znaczenie praktyczne zależność między stopniem sieci Q a liczbą cyklotyczną φ dla różnych wartości liczb (traktowanych jako parametry równań) w postaci:

$$Q = (2\varphi - 3)G \quad (6.44)$$

$$\varphi = \frac{Q(Q - 1)}{2} \tau \quad (6.45)$$



Rys. 6.5. Zależność między stopniem Q a liczbą cyklotyczną φ dla sieci o różnej złożoności G i zwartości τ (punkty odpowiadają analizowanym rzeczywistym schematom kanonicznym)

Tablica 1

Lp.	Kopalnia	Rok	Parametry sieci wentylacyjnej					Wskazniki struktury sieci wentylacyjnej						
			n	m	m'	Q	Q'	Q	K	G _{sr}	β	ε	γ	
1	Anna	1971	131	104	183	74	53	130	8,76	3,11	1,56	0,024	0,89	0,006
2	Bobrek	1969	91	143	136	53	48	90	2,70	3,14	1,57	0,035	0,87	0,012
3	Bolesław Śmiały	1973	105	167	150	63	54	104	2,65	3,18	1,59	0,030	0,84	0,010
4	Borynia	1974	96	154	152	59	57	95	2,61	3,21	1,60	0,034	0,82	0,013
5	Boże Dary	1973	68	108	103	41	36	67	2,63	3,16	1,59	0,047	0,85	0,016
6	Czerwona Gwardia	1979	128	212	197	85	70	127	2,49	3,31	1,66	0,066	0,76	0,005
7	Dębieńsko	1970	156	234	229	79	74	155	2,96	3,00	1,50	0,019	1,00	0,006
8	General Zawadzki	1976	66	107	102	42	37	65	2,55	3,24	1,62	0,050	0,80	0,018
9	Kłosek	1978	80	124	117	45	38	79	2,75	3,10	1,55	0,039	0,91	0,012
10	Knurów	1972	91	144	138	54	48	90	2,67	3,16	1,58	0,035	0,85	0,012
11	Lubin	1976	175	279	274	105	100	174	2,68	3,19	1,59	0,018	0,84	0,007
12	1 Maja	1974	162	258	254	97	93	161	2,66	3,27	1,63	0,020	0,84	0,007
13	Mortkmar-Porabka	1972	170	273	265	104	96	169	2,62	3,21	1,60	0,019	0,82	0,007
14	Myszkowice	1969	109	178	170	70	62	108	2,54	3,27	1,63	0,030	0,77	0,011
15	Pokój	1977	160	243	242	84	83	159	2,89	3,04	1,52	0,019	0,96	0,007
16	Polkowice	1977	200	330	323	131	124	199	2,52	3,30	1,65	0,017	0,77	0,006
17	Palanka	1974	144	229	223	86	80	143	2,66	3,18	1,59	0,022	0,84	0,008
18	Prezydent	1972	130	200	198	71	69	129	2,82	3,08	1,54	0,024	0,93	0,008
19	Radzionków	1970	142	222	215	81	74	141	2,74	3,13	1,55	0,022	0,87	0,008
20	Rydułtowy	1969	252	390	377	139	126	251	2,80	3,09	1,56	0,012	0,91	0,004
21	Theraz	1979	90	141	135	52	46	89	2,71	3,13	1,57	0,035	0,88	0,012
22	Trzebieńka	1970	91	138	134	48	44	90	2,87	3,03	1,52	0,014	0,97	0,011
23	Walentynów	1971	175	272	262	98	88	174	2,77	3,11	1,55	0,018	0,90	0,006
24	Wujak	1969	70	107	105	38	36	69	2,81	3,06	1,53	0,044	0,94	0,015
25	Zienowit	1973	72	116	109	45	38	71	2,58	3,22	1,61	0,045	0,91	0,015

^{a)} Obliczone z pominięciem bocznie wielokrotnych

Powstałe rodziny funkcji $Q = f(Q')$ dla wybranych wartości G i $\tilde{\epsilon}$ przedstawiono na rys. 6.5. Widać z niego, że dla dużych wartości parametrów Q oraz Q' , sieci bardzo złożone są równocześnie sieciami bardzo słabo zwartymi. Sieci silnie zwarte są z kolei bardzo proste lub proste.

Dla oceny struktur sieci wentylacyjnych kopalń istniejących przeanalizowano schematy kanoniczne 25 kopalń węgla i rud z ostatnich dziesięciu lat, dobierając je przypadkowo z obszernego archiwum prac dyplomowych i innych opracowań wentylacyjnych w ITEZ Politechniki Śląskiej. Jedynym kryterium wyboru było wymaganie, aby znajdujący się w dokumentacji pracy schemat kanoniczny użyty został dla celów obliczeniowych, niezależnie od wykorzystanego narzędzia obliczeniowego. Dzięki temu przy odwzorowaniu sieci wentylacyjnej konkretnej kopalni zastosowane zostały uproszczenia, z którymi spotykamy się w praktyce. Na ogół odwzorowane zostały wyrobiska z tamami oddzielającymi, wobec czego przyjęć, można, że zastosowano obciążenie schematów kanonicznych na poziomie $\alpha = z_2$.

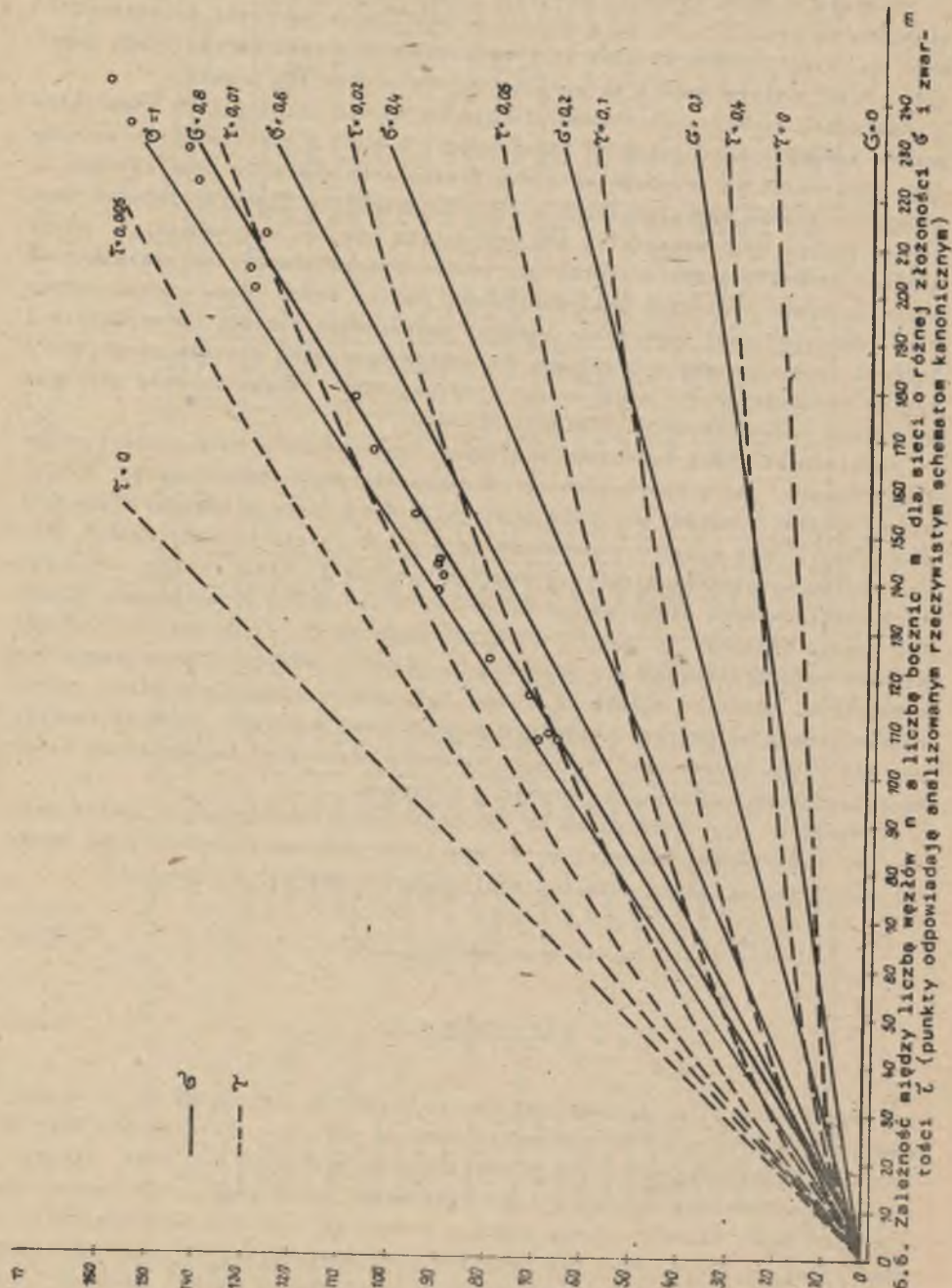
Analizowane sieci są różnej wielkości, co wynikało z rozmaitych rozległości kopalń, jak i zastosowanego uproszczenia przy odwzorowaniu sieci. Najmniejszymi sieciami są G(68,108), G(70,107), a największymi G(252,390) G(200,330). Spis kopalń, podstawowe dane o ich sieciach oraz wyniki obliczeń kilku wskaźników struktury zawiera tablica 1. Widać z niej, że struktury analizowanych sieci ocenić należy jako struktury skomplikowane ($\beta > 1,5$) lub bardzo złożone ($K > 2,5$, $G > 0,75$) oraz bardzo słabo zwarte ($\tilde{\epsilon} < 0,25$). Różnice wielkości sieci nie wpływają na różnice wartości poszczególnych wskaźników. Widać to zwłaszcza z rys. 6.5, gdzie przemiętowe sieci scharakteryzowane są poprzez położenie punktów na wykresie rodziny funkcji $Q = f(Q')$ dla parametrów G i $\tilde{\epsilon}$. Wykazaną właściwość kopalnianych sieci wentylacyjnych można wykorzystywać w praktyce.

Parametry Q , Q' związane są też prostymi zależnościami z liczbą węzłów n oraz liczbą bocznic m w sieciach. Scharakteryzowany przez liczby n, m rozmiar sieci może być analizowany w oparciu o równania:

$$n = \frac{2(mG - G + 1)}{1 + 2G} \quad (6.46)$$

$$m = \tilde{\epsilon} \frac{(n-1)(n-2)}{2} + n - 1 \quad (6.47)$$

Liczby G oraz $\tilde{\epsilon}$ są parametrami równań podobnie jak w (6.44) i (6.45). Rodziny funkcji $n = f(m)$ przedstawiono na rys. 6.6. Może on posłużyć do analizy realizowalności sieci o założonym rozmiarze (n, m) oraz określonych właściwościach struktury, np. złożoności, zwartości. Nie można na przykład żądać skonstruowania sieci o rozmiarze $(15, 32)$, złożoności $G = 0,8$, zawartości $\tilde{\epsilon} = 0,4$, gdyż nie istnieje sieć spełniająca łącznie wszystkie trzy warunki. Również nie można żądać skonstruowania sieci opartej na



Rys. 6.6. Zależność między liczbą wierzchołków n a liczbę bocznic m dla sieci o różnej złożoności G i zawar-
tości γ (punkty odpowiadają analizowanemu rzeczywistym schematom kanonicznym)

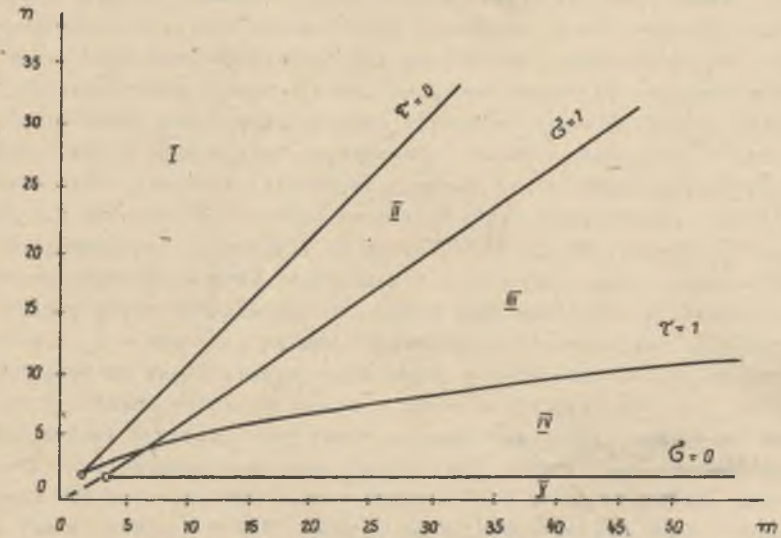
spójnym multigrafie o rozmiarze (20,19), gdyż spójny graf tego rozmiaru może być najwyżej drzewem.

Na rys. 6.6 nanesiono również w postaci punktów większość analizowanych sieci wentylacyjnych. Widać, że obszar praktycznie zrealizowanych rozmiarów sieci jest mały. Łatwo też dostrzec na wykresie pewne linie charakterystyczne, odpowiadające realizacji poszczególnych rodzajów grafów lub sieci:

- $m = 0$ realizacja grafów zerowych,
- $\gamma = 0$ realizacja grafów-drzew,
- $G = 1$ realizacja grafów kubicznych,
- $\gamma = 1$ realizacja grafów pełnych,
- $G = 0$ realizacja grafów bardzo prostych,
- $n = 0$ brak grafu (zbiór wierzchołków pusty).

Ponieważ dla wymienionych wyżej szczególnych rodzajów grafów lub sieci istnieją jednoznaczne związki między liczbami wierzchołków (wzrostów) i krawędzi (bocznic), stanowiąc zwykle ich definicje, przynależność grafu do jednej z linii charakterystycznych jest warunkiem koniecznym i wystarczającym dla realizowalności odpowiadającego jej rodzaju grafu.

Punkty przecięcia linii charakterystycznych odpowiadają grafom będącym równocześnie grafami różnego rodzaju. Linie charakterystyczne wyznaczają z kolei granice pięciu obszarów (rys. 6.7) reprezentujących zbiory grafów rozróżnialnych również w teorii grafów (unigrafy, multigrafy, grafy spójne, niespójne), a mianowicie:



Rys. 6.7. Sposób wyróżnienia pięciu obszarów zawierających grafy różnego rodzaju

- I Obszar unigrafów niespójnych (lasów),
- II Obszar unigrafów spójnych z półwęzłami,
- III Obszar unigrafów lub multigrafów spójnych bez półwęzłów.
- IV Obszar multigrafów wielokrotnych,
- V Obszar grafów pętlowych (rozet).

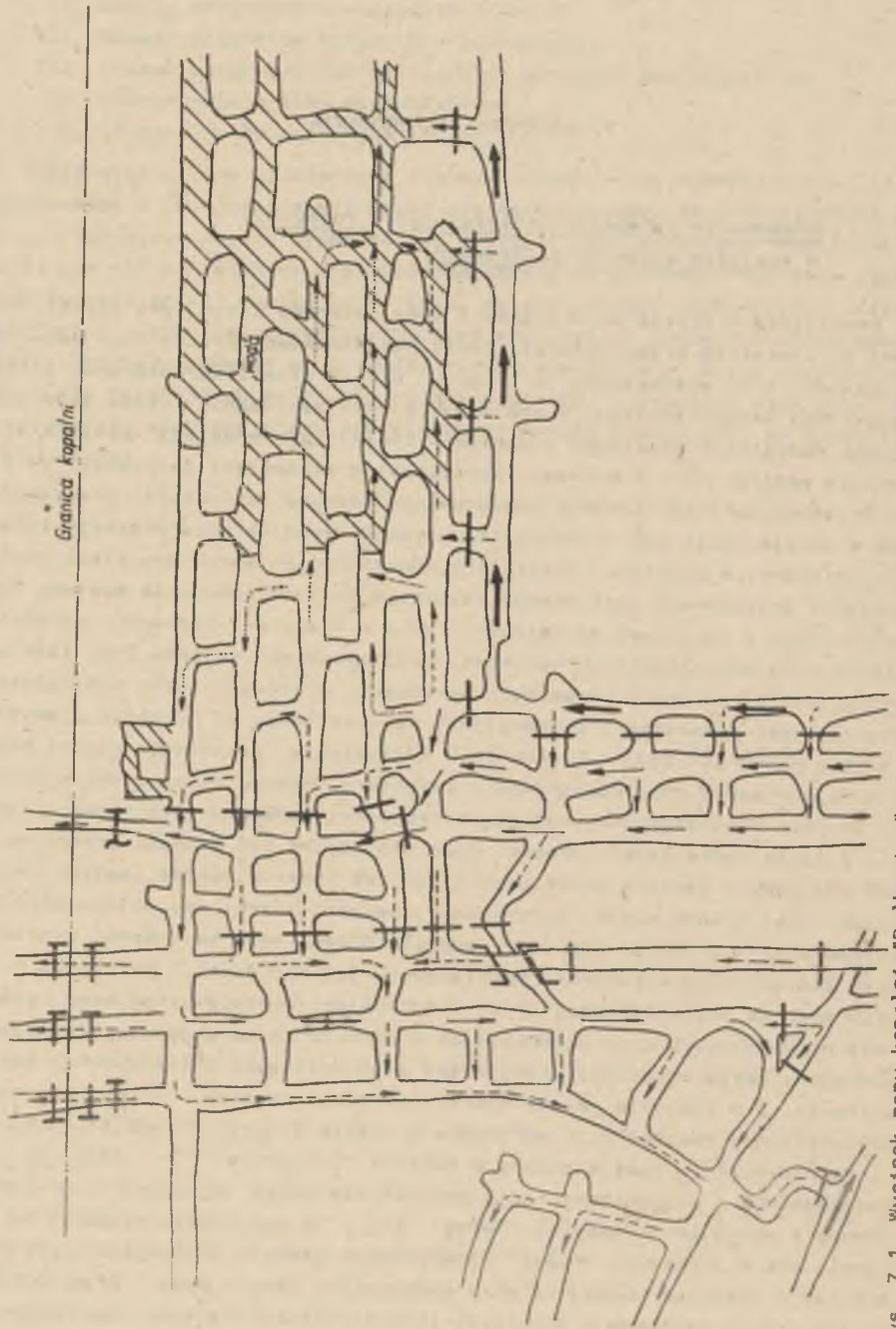
Opierając się na założeniach sformułowanych przy wyprowadzaniu liczb złożoności i zwartości sieci można postawić wniosek, że przynależność grafu do jednego z pięciu wyznaczonych obszarów jest warunkiem wystarczającym, ale nie koniecznym, dla realizowalności określonego dla tych obszarów rodzaju grafu. Wynika to z faktu, że analizowane cechy grafów nie są rozłączne i może być zrealizowany graf tego samego rodzaju w innym obszarze - chociaż trudniej go znaleźć. Wyznaczone obszary można nazwać typowymi dla określonych przez nie rodzajów grafów. Osiągnięto więc przy okazji analizy struktur sieci wentylacyjnej pewien przyczynek do klasyfikacji grafów.

7. NIEKTÓRE ZASTOSOWANIA

7.1. Stosowanie schematów wentylacyjnych rozmytych w analizie sytuacji pożarowych

Powstające w czasie pożaru gazy i dymy pożarowe płyną tymi samymi drogami co powietrze przed pożarem, jeśli nie rozważać różnorodnych zaburzeń przepływu. Przy wyznaczeniu w czasie akcji ratowniczo-pożarowej strefy zadymienia bezpośredniego, a tym samym strefy zagrożenia, ważna jest znajomość wszystkich możliwych przepływów powietrza w podsieci zawierającej ognisko pożaru. Mapy i schematy wentylacyjne stanowiące załączniki do planu przeciwpożarowego powinny odwzorowywać rozmytą strukturę przepływową aby w czasie akcji jak najwcześniej uzyskać właściwą interpretację sytuacji pożarowej w podsieci. Dotychczas odwzorowanie struktury sieci wentylacyjnej dostosowane jest przede wszystkim do funkcjonowania systemu wentylacyjnego w warunkach normalnych. Toteż w wielu przypadkach odrębność między sobą poszczególnych wyrobisk, grup wyrobisk, rejonów itp. jest pozorną. Wystarcza ona w normalnych warunkach, w których tylko minimalizuje się ucieczki powietrza i uniemożliwia wejście ludzi do wyrobisk niewystarczająco przewietrzanych. W warunkach wystąpienia zagrożenia gazami pożarowymi potrzebne jest odwzorowanie struktury sieci nawet z dokładnością do bocznic stanowiących wyrobiska zarabowane, podsadzone, izolowane tamami, a także różne części zrobów. Mogą one bowiem być drogami przepływu gazów pożarowych zawierających gazy szkodliwe nawet w bardzo małych stężeniach, jak: tlenek węgla, cyjanowodór, związki siarki czy chloru. Gazy pożarowe przefiltrowane, nie dając sygnału dymem, mogą zaatakować wycofujących się górników w pozornie bezpiecznych już miejscach. Wyrobiska o niskim stopniu przynależności do struktury sieci wentylacyjnej mogą pełnić rolę przypadkowych dróg ucieczkowych w okresie samoratownia się załogi. Kierujący akcją przeciwpożarową muszą mieć możliwość przewidywania takiej sytuacji, a w tym celu należy dysponować odwzorowaniem struktury sieci wentylacyjnej zawierającym wyrobiska o niskim stopniu przynależności.

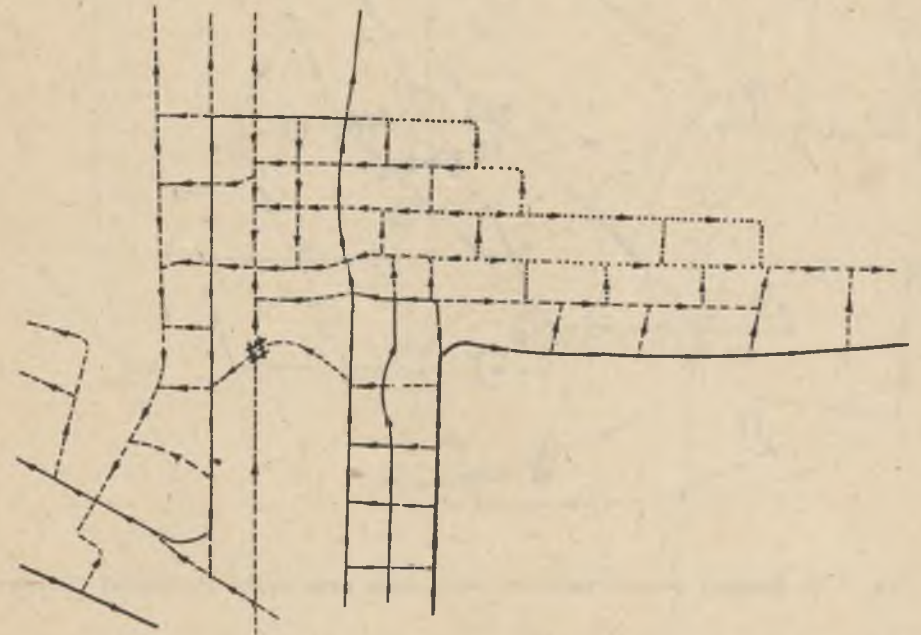
Na przykład, w czasie pożaru w kopalni "Polkowice" w 1979 r. nie uwzględniono w początkowej fazie prowadzenia akcji połączeń zagrożonego rejonu z wyrobiskami kopalni "Rudna" [116]. O zadymieniu wyrobisk na poziomie 900 m w kopalni "Rudna" zadecydowało głównie istniejące wtedy otwarcie tam w chodniku W-222, bo przy zamkniętych tamach dymy przeniknęłyby na ten poziom na pewno w mniejszej ilości. Połączenia sieci wentylacyjnej kopalni "Polkowice" z siecią wentylacyjną kopalni "Rudna" nie były zinter-



Rys. 7.1. Wycinek mapy kopalni "Polkowice" z rejonu zagrożonego gazami pożarowymi i rozmytym odwzorowaniem przepływów powietrza

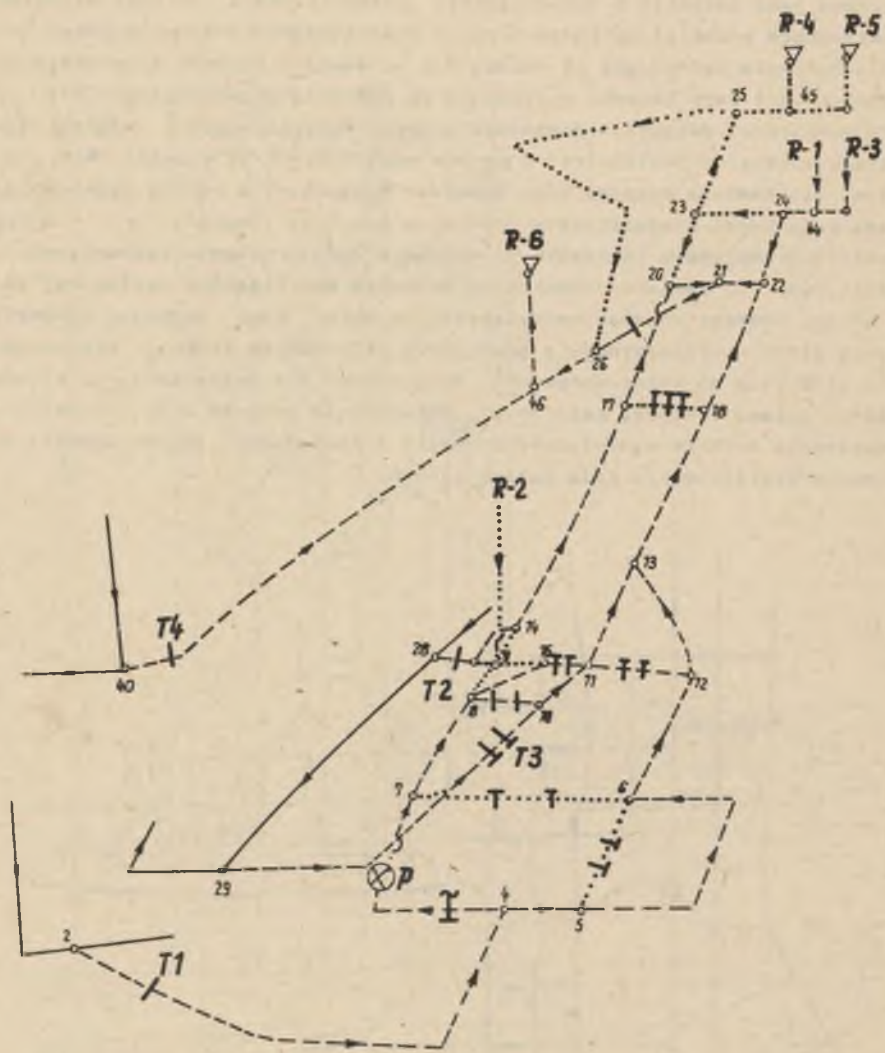
pretowane jako bocznice o dużym stopniu przynależności do ich struktur (traktowanych przecież odrębnie z racji wyodrębnienia organizacyjnego kopalń). Być może istniejąca na mapach lub schematach wyraźna interpretacja przynależności tych bocznic wpłynęłaby na podjęcie wcześniejszej (niż po dwóch godzinach) decyzji o dokonaniu spięcia wentylacyjnego zagrożonego oddziału w kopalni "Polkowice" z szybem wydechowym R. VI kopalni "Rudna".

Rys. 7.1 zawiera wycinek mapy kopalni "Polkowice" z rejonu zagrożonego gazami pożarowymi w sąsiedztwie granicy z kopalnią "Rudna" z rozmytą strukturą przepływową (strzałki przepływu o różnym stopniu zaczerńnienia). Z kolei rys. 7.2 zawiera odwzorowane bocznice wentylacyjne według tej samej umowy, tworząc schemat wentylacyjny rozmyty. Tego rodzaju schematy rozmyte sieci wentylacyjnej, z graficznym oznaczeniem stopnia przynależności elementów do całej struktury, mogą służyć dla wyznaczania strefy zagrożenia gazami i dymami pożarowymi, wskazywania załódze dróg ewakuacji i poszukiwania środków wentylacyjnych walki z zagrożeniem gazami poprzez odpowiednie kształtowanie pola potencjalnego.

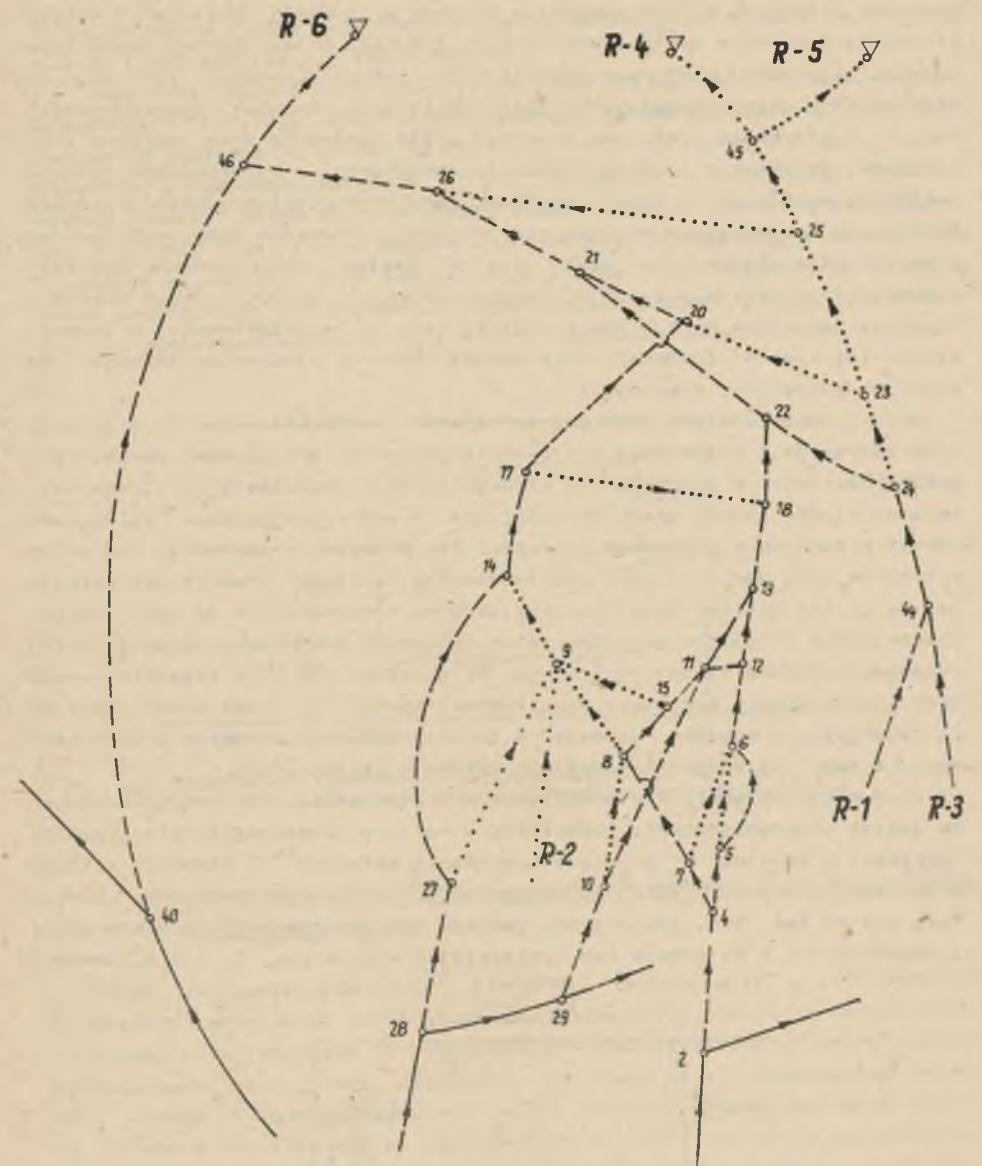


Rys. 7.2. Schemat wentylacyjny rozmyty odpowiadający wycinkowi mapy z rys. 7.1

W niektórych sytuacjach w czasie gaszenia pożaru doprowadza się do celowego obniżenia stopnia przynależności bocznic do istniejącej struktury sieci wentylacyjnej. Dzieje się tak w przypadku tworzenia pól pożaro-



Rys. 7.3. Schemat przestrzenny rozmyty pola pożarowego w kopalni "Silesia"

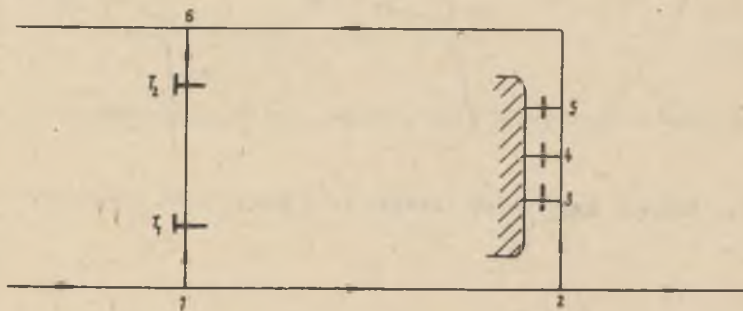


Rys. 7.4. Schemat kanoniczny rozmyty pola pożarowego w kopalni "Silesia"

wych. Na przykład, w czasie walki z pożarem w kopalni "Silesia" (1979) stworzone zostało w wyrobiskach pokładu 214/1-2 pole pożarowe obejmujące oddział wydobywczy G-VI oraz oddział robót przygotowawczych GRP-21, a więc znaczny obszar kopalni. W czasie akcji poszukiwania uszkodzonych pole to pozostawało częściowo otwarte, a dla skrócenia dróg dojścia ratowników, stosowania lokalnej rewersji wentylacji i recyrkulacji gazów a także dla wychładzania części wyrobisk parującym ciekłym azotem, korzystano z kilku ratowniczych otworów wiertniczych. Niektóre tamy wentylacyjne wewnątrz pola uległy zniszczeniu, ale na skutek oddziaływania wysokiej temperatury powstały z kolei w wielu wyrobiskach zawały o dużym zasięgu. Bocznicę wentylacyjną i prądy powietrza (lub gazów pożarowych) w części zachodniej kopalni posiadały więc bardzo różny stopień przynależności do sieci wentylacyjnej kopalni.

Dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów charakterystyki otoczenia utworzonego pola pożarowego sterowano skutecznie przepływami powietrza i gazów pożarowych o wydatkach od kilkunastu do kilkudziesięciu m^3/min . Użytkiwano między innymi stany wentylacyjne, w których wymuszano tylko tendencję przepływu w pożądanym kierunku. Tak precyzyjne panowanie nad polem pożarowym było możliwe, gdyż uwzględniano w analizie sytuacji wentylacyjnej wszystkie możliwe bocznicę wentylacyjne - niezależnie od ich oporu. Zastosowanie schematów wentylacyjnych rozmytych pomogłoby jeszcze lepiej rozpoznać podobną sytuację pożarową. Na przykład rys. 7.3 przedstawia możliwą interpretację struktury przepływowej wewnątrz i wokół utworzonego pola pożarowego w kopalni "Silesia" w formie rozmytego schematu przestrzennego, a rys. 7.4 w formie rozmytego schematu kanonicznego.

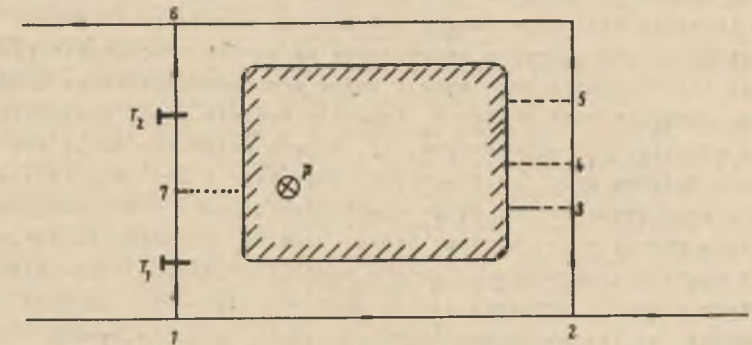
Inny przykład wiąże się z błędem w rozmieszczeniu tam wentylacyjnych na skutek nieuwzględniania rozmytości struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej. W kopalni "M" powstało zagrożenie pożarowe w zrobach pokładu skłonnego do samozapalenia. Sytuację wentylacyjną interpretowano bowiem tak, jak na rys. 7.5, gdzie zrobki pokładu odizolowane były od dowerzchni i chodnika 2 - 6 za pomocą tam izolacyjnych w punktach 3, 4 i 5. Uważano



Rys. 7.5. Przykład błędnego odwzorowania fragmentu sieci wentylacyjnej w kopalni "M"

więc, że są to jedyne połączenia wyrobisk czynnych ze zrobami mające znaczenie i podlegające tym samym kontroli.

Zrobki były jednakże dodatkowo odizolowane od pochylni transportowej 1-6 w punkcie 7 (rys. 7.6) korkiem podsadzkowym. Korek podsadzkowy uznano za całkowite oddzielenie zrobów od pochylni 1-6 i nie zwrócono uwagi na rozmieszczenie tam wentylacyjnych T_1 i T_2 w śluźce przejazdowej. Pozostawienie otwartej przez dłuższe okresy czasu jednej z tam śluźki wentylacyjnej stwarzało niekorzystne zmiany w ukształtowaniu się pola potencjalnego i dopływy większych ilości powietrza do zrobów przez niezupełnie szczelny korek podsadzkowy. Ten nieuwzględniony kontakt zrobów z pochylnią transportową wystarczył dla powstania w nich nieoczekiwanego ogniska pożaru.



Rys. 7.6. Prawidłowe odwzorowanie fragmentu sieci wentylacyjnej w kopalni "M" (rys. 7.5) uwzględniające rozmycie struktury sieci

7.2. Projektowanie rozmieszczenia czujników wydatku przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej

Rozwój aerometrii postępuje w kierunku zastosowania automatycznych przyrządów pomiarowych zainstalowanych w wybranych miejscach sieci wentylacyjnej, rejestrujących lub wskazujących zdalnie wartości kontrolowanych parametrów wentylacyjnych. Zapewniają one ciągłość i jednoczesność pomiarów, a przez to dużą szybkość wykrywania zaburzeń w przewietrzaniu kopalni. Jednym z podstawowych parametrów kontrolowanych w czasie przewietrzania kopalni jest wydatek prądu powietrza, który można mierzyć pośrednio za pomocą automatycznych czujników prędkości powietrza. Powstał więc problem rozmieszczenia takich czujników w sieci wentylacyjnej, gdyż wybór miejsc zależy od struktury sieci, wartości wydatków prądów, stopnia szczególności przeprowadzonej analizy przewietrzania, możliwości technicznych zainstalowania czujników itp.

Ponieważ wszystkie wydatki przepływu w dowolnej sieci możemy wyrazić za pomocą wydatków w bocznicach jej antydendrytu, to dla znalezienia stanu przepływowego w sieci wystarczy mierzyć wydatki przepływu w bocznicach jakiegokolwiek antydendrytu, chociaż lepiej, aby składał się on z bocznic o największym wydatku.

Niech na przykład schemat kanoniczny $G(n, m)$ odwzorowuje sieć rzeczywista z dokładnością do rejonów wentylacyjnych. Antydendryt takiej sieci będzie zawierał kilkadziesiąt bocznic (tablica 1 - wartości ψ) i tyloma czujnikami przepływu należałoby rozporządzać dla zautomatyzowania pomiarów wentylacyjnych. Można oczywiście odwzorować sieć z mniejszą szczegółowością i do niej dostosować układ czujników pomiarowych, ale ograniczy to rozpoznanie przepływu powietrza w sieci. W każdym też przypadku istnieje granica uproszczenia odwzorowanej sieci, wynikająca z jej struktury, a tym samym istnieje minimalna liczba potrzebnych miejsc pomiarowych.

Urządzenia wentylacyjne umieszczone są w niektórych bocznicach sieci, a do tego tylko część z nich może z dużym prawdopodobieństwem ulegać uszkodzeniu. Oznaczmy więc przez B podzbiór bocznic sieci zawierających urządzenia wentylacyjne uszkodzalne, tj. mogące zmieniać nagle swą charakterystykę. Załóżmy przy tym dwustanowy charakter pracy urządzeń: stan zdatności - stan uszkodzenia. Zbiór wszystkich bocznic sieci oznaczmy przez U .

Zmiana charakterystyki (np. oporu) dowolnej boczniczy zawierającej urządzenie wentylacyjne powoduje zmianę wydatku przepływu wszystkich prądów powietrza w sieci. Ponieważ jednak sieć wentylacyjna cechuje się małą zwartością, to losowa zmiana charakterystyki boczniczy wywoła różną zmianę wydatku przepływu poszczególnych prądów. Wielkość zmiany wydatku ocenimy możemy wskaźnikiem wrażliwości [2]:

$$k_{j1} = \frac{\dot{v}_1^{(j)}}{\dot{v}_1^{(N)}} \quad (7.1)$$

gdzie:

- $\dot{v}_1^{(j)}$ - wydatek prądu powietrza w i -tej boczniczy pod wpływem uszkodzenia w j -tej boczniczy,
- $\dot{v}_1^{(N)}$ - wydatek prądu powietrza w i -tej boczniczy w stanie zdatności.

Przyjmijmy, że uszkodzeniu może ulec urządzenie w dowolnej boczniczy ze zbioru B , a liczność tego zbioru jest bliska liczbie bocznic antydendrytu sieci. Przyjmijmy dla uproszczenia analizy, że jest ona równa liczbie bocznic antydendrytu, tzn. $B = m - n + 1$.

Kontrolę funkcjonowania systemu wentylacyjnego opartą na pomiarach wydatków przepływu zorganizować można w dwojaki sposób:

- 1) mierząc wydatki przepływu we wszystkich bocznicach uszkodzalnych $u_j \in B$ (dla $j = 1, \dots, m - n + 1$),

- 2) mierząc wydatki przepływu w bocznicach antydendrytu sieci wybranego w taki sposób, aby najdokładniej wyznaczyć stan przepływowy charakterystyczny dla każdego uszkodzenia.

Sposób pierwszy, jako intuicyjnie dosyć oczywisty, znalazł zastosowanie w praktyce. W przypadku posiadania wolnych czujników anemometrycznych w dyspozytorniach metanometrycznych instaluje się je w wyrobiskach zawierających ważne tamy oddzielające, które mogą być przypadkowo otwierane.

Mało prawdopodobne jest jednakże, aby bocznicze uszkodzalne tworzyły antydendryt sieci, tak więc informacja przesyłana do czujników nie pozwalają wyznaczyć stanu przepływowego sieci. Poza tym wydatki prądów otamowanych są zbyt małe i pomiar nie jest dokładny. Lepiej więc stany przepływowe wyznaczyć drogą wcześniejszych obliczeń symulacyjnych. Analiza skutków uszkodzenia będzie wtedy mniej dokładna, trudno się bowiem spodziewać, aby zrealizowany samodzielnie nowy stan przepływowy odpowiadał dokładnie stanowi symulowanemu. Uzyskujemy natomiast pewność wskazania miejsca (lub miejsc) uszkodzenia urządzeń wentylacyjnych w sieci.

Drugi sposób jest odwrotnym w stosunku do pierwszego, gdyż rozmieszczenie czujników ma pozwolić dokładnie wyznaczyć stan przepływowy, a dopiero na podstawie porównania go ze wzorcowymi symulowanymi stanami obliczeniowymi wykrywa się miejsce (lub miejsca) uszkodzenia systemu wentylacyjnego. Ocena skutków uszkodzenia i powstałego zagrożenia będzie wtedy dokładna, natomiast mogą powstać trudności przy odszukaniu miejsca uszkodzenia. Zmierzone wartości wydatku przepływu mogą różnić się od wartości obliczonych. Stan zmierzony może być bliski nie jednemu, ale dwom lub trzem symulowanym stanom obliczeniowym, co utrudni wskazanie miejsca uszkodzenia.

Na tę trudność wskazał Patigny [109] uzasadniając nie konieczność współdziałania człowieka z systemem sterowania komputerowego dla właściwego podjęcia decyzji o regulacji sieci. W systemie wentylacyjnym nie zautomatyzowanym trzeba będzie uzyskać dodatkową informację o sieci umożliwiającą rozróżnienie miejsc o prawdopodobnym uszkodzeniu. Stany przepływowe trudne do rozróżnienia można wcześniej przeanalizować w trakcie obliczeń symulacyjnych i zastosować ewentualne dodatkowe czujniki eliminując tę wieloznaczność.

Biorąc pod uwagę ważność znajomości rzeczywistego stanu przepływowego w sieci, sposób drugi, mimo ewentualnych trudności z wykryciem miejsca uszkodzenia urządzenia, jest bardziej przydatny dla kierowania przewietrzaniem kopalni. Powstaje jednak zagadnienie, jak wybrać antydendryt sieci dla rozmieszczenia czujników pomiarowych, aby wybór był dobry dla wszystkich bocznic uszkodzalnych $u_j \in B$. Zagadnienie, sprowadza się do uporządkowania bocznic w sieci wentylacyjnej, poczynając od bocznic o najmniejszej wrażliwości na uszkodzenia wszystkich bocznic $u_j \in B$ aż do bocznic o najwyższej wrażliwości.

Przeprowadzone w tym celu obliczenia symulacyjne rozpięty powietrza powinny objąć wszystkie bocznicę z możliwymi uszkodzeniami urządzeń wentylacyjnych. Zakładamy będziemy niezależność i nierównoczesność uszkodzeń poszczególnych urządzeń, chociaż nie jest to warunek bezwzględnie konieczny.

Znając, po obliczeniach, stan przepływu znajdujemy wartości wskaźnika k_{ji} dla $i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, l$ oraz $l \leq m$. Wartości te można zestawiać w postaci macierzy wrażliwości wzorowanej na ogólniejszej macierzy wzajemnych powiązań [2]:

$$K = \begin{matrix} & u & 1 & 2 & \dots & l & \dots & m \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ j \\ \vdots \\ l \end{matrix} & \begin{matrix} k_{11} \\ k_{21} \\ \vdots \\ k_{j1} \\ \vdots \\ k_{l1} \end{matrix} & \begin{matrix} k_{12} \\ k_{22} \\ \vdots \\ k_{j2} \\ \vdots \\ k_{l2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} k_{1l} \\ k_{2l} \\ \vdots \\ k_{jl} \\ \vdots \\ k_{ll} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} k_{1m} \\ k_{2m} \\ \vdots \\ k_{jm} \\ \vdots \\ k_{lm} \end{matrix} \end{matrix} \quad (7.2)$$

Dla każdej bocznicę u_i obliczymy średnią wartość kwadratu różnicy wskaźników k_{ji} od jedności, jako wartości odpowiadającej stanowi zdatości bocznicę, posługując się wzorem:

$$d_i = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (1 - k_{ji})^2 \quad (7.3)$$

Wartości d_i są liczbami rzeczywistymi, które można przyporządkować poszczególnym bocznicom sieci. Zbiór bocznic $u_i \in U$ można więc uporządkować ze względu na relację mniejszości przyporządkowanych im liczb d_i .

Mając uporządkowanie zbioru bocznic według wartości obciążenia powstałej w ten sposób sieci $S(n, m)$:

$$S = \langle G, \{d_i\} \rangle \quad (7.4)$$

można wybrać dendryt minimalny, tzn. taki, dla którego:

$$\sum_{i=1}^{n-1} k_{ji} = \text{minimum} \quad (7.5)$$

Tworzymy w tym celu kolejne grafy częściowe sieci $S(n, m)$ o najmniejszym obciążeniu sumarycznym, poczynając od grafu pustego, a kończąc na poszukiwanym dendrycie.

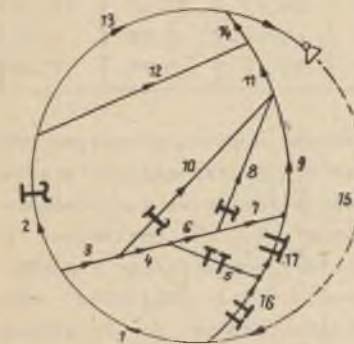
Zaczynamy od wyboru pierwszej bocznicę z uporządkowanego zbioru bocznic. Kolejną bocznicę dołączamy do wybranej pod warunkiem, że nie tworzy z poprzednimi cyklu. Jeśli bocznicę dołączona tworzyłaby cykl z bocznicami już wybranymi, to odrzucamy ją i bierzemy następną z uporządkowanego zbioru U . Procedura wyboru bocznicę kończy się, gdy wybrane bocznicę łączą wszystkie węzły sieci, a utworzony graf częściowy jest dendrytem [16, 46, 50, 82].

Bocznicę odrzucone w liczbie $m - n + 1$ tworzą antydendryt maksymalny sieci $S(n, m)$, tzn. taki, dla którego:

$$\sum_{i=1}^m k_{ij} = \text{maximum} \quad (7.6)$$

W bocznicach wybranego antydendrytu należy umieścić czujniki wydatku przepływu powietrza, a dla poszczególnych przypadków możliwych uszkodzeń systemu wentylacyjnego zestawiać wzorcowe stany przepływu, do których przyrównywany będzie zmierzony stan rzeczywisty.

Przykładowo, w sieci wentylacyjnej oddziały wydobywczego jak na rys. 7.7, dane są opory bocznic 1, 2, ..., 17 oraz napięcie wentylatora zastępczego, które wynosi 338,4 Pa dla szerokiego zakresu zmian wydatku przepływu. Z powodu zastosowania transportu linowego tamy wentylacyjne w bocznicach 2, 8, 10 i 16 są często otwierane. Rozmieścimy w tej sieci czujniki zdalnego pomiaru wydatku powietrza dla wykrywania miejsc otwarcia tam wentylacyjnych i stwierdzenia rozpięty powietrza ukształtowanego w wyniku powstałego uszkodzenia systemu wentylacyjnego oddziały.



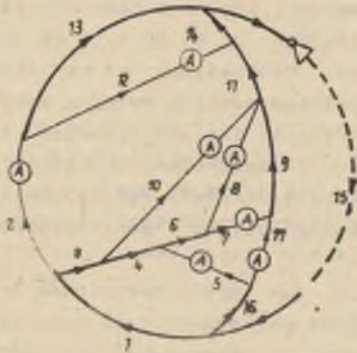
Rys. 7.7. Schemat kanoniczny przykładowej sieci wentylacyjnej zawierającej łatwo uszkodzalne bocznicę

W tym celu dla stanu normalnego oraz czterech stanów uszkodzeniowych obliczone zostały na emc rozpięty powietrza w analizowanej sieci wentylacyjnej. Wyniki obliczeń zamieszcza tablica 2 łącznie z danymi o oporach bocznic przed i po uszkodzeniach.

Tablica 2

Stany przepływowe w sieci wentylacyjnej z rys. 7.7

Nr bocznic	Opór bocznic $[N.s^2/m^8]$	Opór bocznic uszkodz. $[N.s^2/m^8]$	Wydatek przepływu w $[m^3/s]$				
			Stan norm.	Uszk. u_2	Uszk. u_8	Uszk. u_{10}	Uszk. u_{16}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,095		33,74	40,15	34,75	35,79	33,42
2	16,677	0,490	3,49	14,29	3,42	3,34	3,50
3	0,050		30,25	25,85	31,33	32,44	29,91
4	0,026		16,76	14,22	19,14	12,98	16,36
5	91,233		0,84	0,94	0,88	0,91	1,30
6	0,069		17,60	15,17	10,03	13,89	17,67
7	0,510		8,78	7,55	6,65	6,91	8,78
8	0,774	0,196	8,81	7,62	13,38	6,98	8,89
9	0,225		9,58	6,35	7,44	7,68	9,83
10	0,490	0,147	13,48	11,63	12,18	19,46	13,55
11	0,067		31,89	27,60	33,01	34,12	32,27
12	0,579		0,76	9,41	0,62	0,47	0,74
13	3,561		2,72	4,88	2,80	2,87	2,75
14	0,024		32,66	37,01	33,63	34,59	33,02
15	0,000		35,38	41,90	36,43	37,47	35,78
16	36,100	0,490	1,64	1,75	1,67	1,68	2,39
17	196,200		0,80	0,80	0,79	0,76	1,05



Rys. 7.8. Wyznaczone rozmieszczenie czujników wydatku przepływu powietrza w rozważanej przykładowej sieci wentylacyjnej

Z kolei znając wydatki przepływu prądów powietrza dla poszczególnych stanów przepływowych obliczono wartości wskaźnika wrażliwości k_{ji} i zestawiono w tablicy 3 macierz wrażliwości. Posługując się formułą (7.3) obliczono dla bocznic wartości średnie d_i wskaźnika wrażliwości dla wszystkich stanów uszkodzeniowych sieci. Wartości d_i podaje również tablica 3.

Zbiór U bocznic sieci uporządkowany został ze względu na relację mniejszości między odpowiedziami im liczbami d_i . W wyniku tego uzyskano następujące uporządkowanie zbioru bocznic:

$$U = \{u_{14}, u_{11}, u_3, u_{15}, u_1, u_6, u_4, u_9, u_7, u_{16}, u_{10}, u_5, u_8, u_{17}, u_{13}, u_2, u_{12}\}$$

Tablica 3

Macierz wrażliwości K i wartości wskaźnika d_i dla rozważonego przykładu sieci wentylacyjnej z rys. 7.7

$u_i \backslash u_j$	2	8	10	16	d_i
2	1,18	1,03	1,06	0,99	0,009
8	4,09	0,98	0,96	1,00	2,38
10	0,85	1,04	1,07	0,99	0,007
16	0,86	1,14	0,79	1,00	0,021
3	1,12	1,05	1,08	1,55	0,081
4	0,85	1,14	0,77	0,98	0,024
5	0,86	0,76	0,79	1,00	0,030
6	0,86	1,52	0,79	1,01	0,083
7	0,87	0,78	0,80	1,03	0,026
9	12,38	0,82	0,62	0,97	32,42
11	0,87	1,04	1,07	1,01	0,006
12	1,79	1,03	1,06	1,01	0,157
13	1,13	1,03	1,06	1,01	0,005
14	1,18	1,03	1,06	1,01	0,008
15	1,18	1,03	1,06	1,01	0,009
17	1,00	1,02	1,02	1,46	0,054

Z powyższego uporządkowanego zbioru bocznic wybrano dendryt minimalny, zaznaczony na rys. 7.8 linią pogrubioną. Pozostałym bocznicom przyporządkowane są najwyższe wartości d_1 , tak więc stanowią one poszukiwany antydendryt, w którym należy rozmieścić czujniki wydatku przepływu.

7.3. Analiza możliwości ewakuacji górników z zagrożonego rejonu kopalni

W trakcie wycofywania się górników z miejsc pracy zagrożonych, np. pożarem, zawałem, wodą, przedostanie się do innego węzła wiązać się może z osiągnięciem świeżego prądu powietrza, uzyskaniem pomocy, zaopatrzeniem w środki ochrony itp. Z kolei miejsca o istotnej zmianie stopnia zagrożenia (np. punkt wymiany pochłaniaczy, stacje środka transportu, miejsce z sygnalizacją alarmową itp.) traktowane mogą być jak węzły, dokładniej - półwęzły.

Intuicyjnie wyczuwamy, że niezależnie od rodzaju zagrożenia wycofanie się górników jest tym łatwiejsze, im jest więcej połączeń między tego rodzaju węzłami, a więc im większa jest zwartość struktury sieci. Rys. 7.9 przedstawia przykład dwóch sieci S_a i S_b , różniących się tylko - dla ułatwienia porównania - liczbą dróg ucieczkowych z miejsc pracy (półwęzły 8, 9, ..., 12). Według wzoru (6.27) obliczamy wartość liczby zwartości:

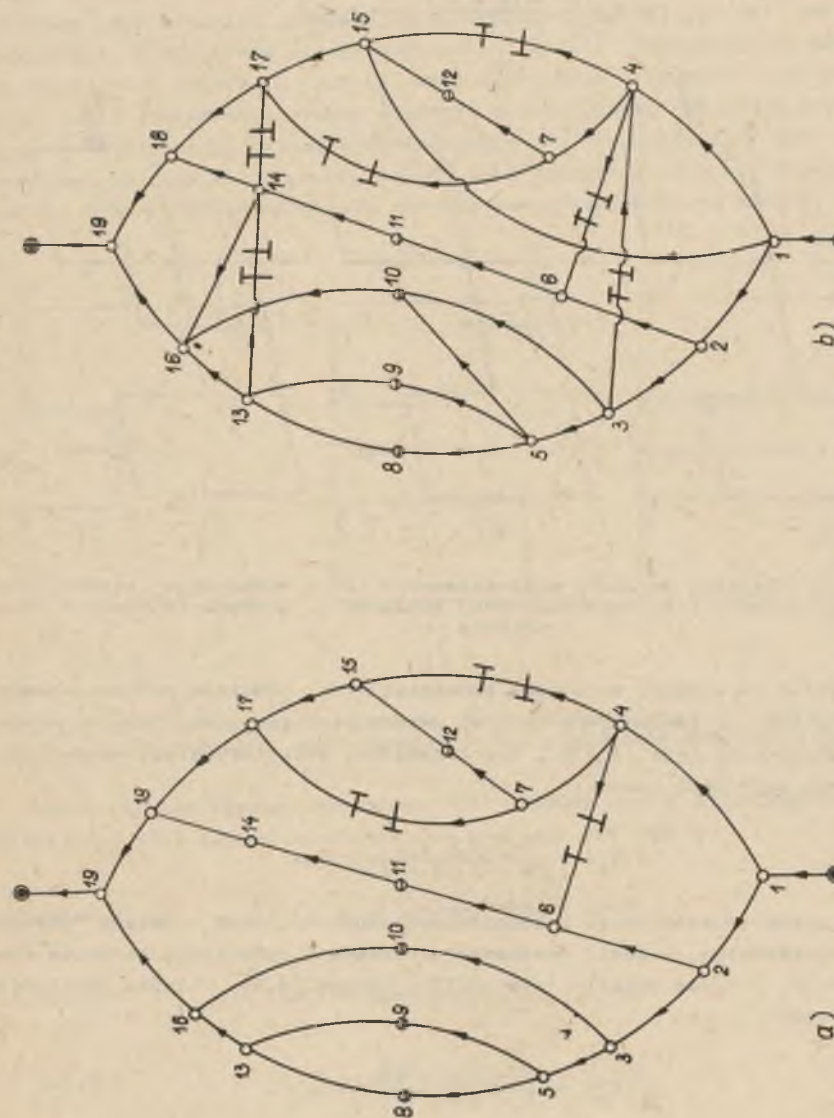
$$\bar{z}(S_a) = \frac{2(25 - 19 + 1)}{(19 - 1)(19 - 2)} = 0,046$$

$$\bar{z}(S_b) = \frac{2(31 - 19 + 2)}{(19 - 1)(19 - 2)} = 0,085$$

W przypadku (b) istnieją więc większe możliwości ewakuowania się górników do innych miejsc w kopalni.

Zauważmy, że w sieci odwzorowanej przez unigraf-drzewo pojawienie się pożaru, zawału lub wypływu wody w dowolnej bocznicy odcina drogę wycofania się zagrożonym górnikom i słusznie taka struktura oceniona jest wartością $\bar{z}(S) = 0$. Przypadek ten odpowiadałby kopalni z przodkami ślepy, przewietrzanej w dodatku bez wykorzystania jakiegokolwiek prądu obiegowego.

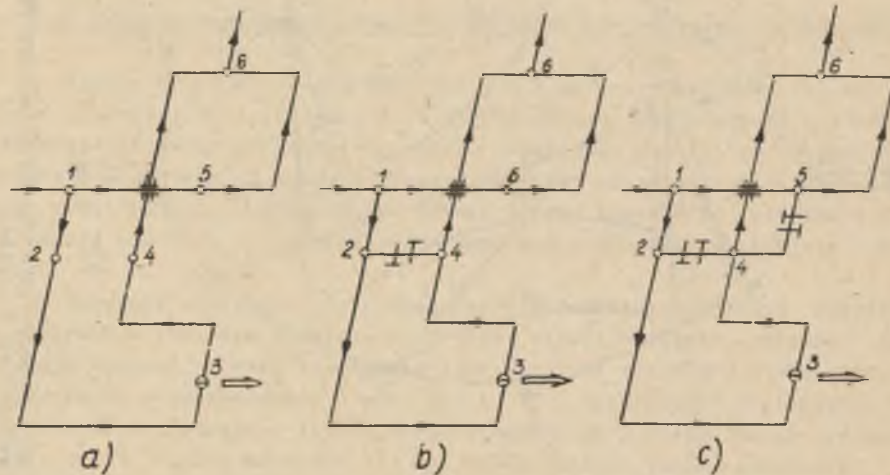
Rozpatrzmy z kolei typowy oddział podziemowy jak na rys. 7.10a, z którym praktyka wiąże niebezpieczne w skutkach pożary egzogeniczne. Miejsce niebezpiecznego pożaru wyznacza dodatkowy węzeł (2), natomiast węzeł (3) określa miejsce pracy zagrożonych górników. Węzeł (4) dzieli drogę {3,6} na dwie części i przyjmujemy, że jedną z nich, tj. {3,4} można przebyć bezpiecznie, a drugą znacznie trudniej ze względu na większe nachylenie i długość. Przyjmujemy też, że zagrożenie górników znika po osiągnięciu przez nich węzłów (1) lub (6). Tym samym wycofanie się ich do drogi {1,6} również likwiduje zagrożenie i fakt ten wyrażamy przez wprowadzenie



Rys. 7.9. Przykład dwóch sieci różniących się liczbę zwartości wskazującą w sposób ilościowy różne możliwości ewakuacji górników do innych miejsc w kopalni

węzła pośredniego (5) jako miejsca bezpiecznego. Uzyskana strukturę sieci oddziałowej (rys. 7.10a) oceniamy z uwagi na jej zwartość liczbą:

$$\bar{z}(S_a) = \frac{2(6 - 6 + 1)}{(6 - 1)(6 - 2)} = 0,1$$



Rys. 7.10. Przykład oddziału podpoziomowego (a) i stworzenie struktury o wyższej zwartości przy zabezpieczeniu sposobem W. Budryka (b) oraz H. Bystronia (c)

W. Budryk wprowadził dodatkowe zabezpieczenie oddziału podpoziomowego poprzez układ tam bezpieczeństwa oraz zmianę struktury spowodowaną wykonaniem drogi {2,4} (rys. 7.10b). Dla zmienionej struktury sieci oddziałowej liczba zwartości wynosi:

$$\bar{z}(S_b) = \frac{2(7 - 6 + 1)}{(6 - 1)(6 - 2)} = 0,2$$

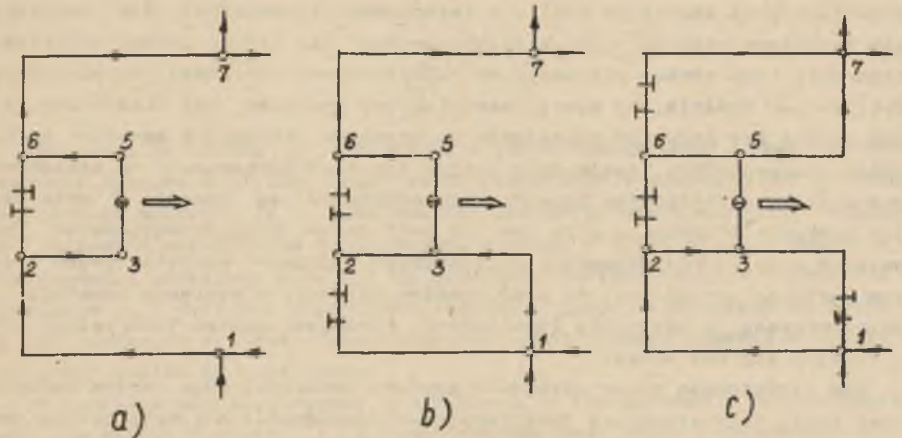
H. Bystron udoskonalając zabezpieczenie Budryka, obok zmiany układu tam bezpieczeństwa, zalecił wykonanie dodatkowego połączenia boczną stawniącą tzw. trzecie wyjście (rys. 7.10c), droga {4,5}. Liczba zwartości wynosi wtedy:

$$\bar{z}(S_c) = \frac{2(8 - 6 + 1)}{(6 - 1)(6 - 2)} = 0,3$$

Uzyskaliśmy więc ilościowe potwierdzenie korzystniejszej struktury sieci oddziału podpoziomowego dla zabezpieczenia metodą Bystronia.

Innym fragmentem kopalni podlegającym dodatkowemu zabezpieczeniu jest wyrobisko ścianowe wraz z najbliższymi przylegającymi chodnikami. Sytua-

cję tę przedstawia rys. 7.11a, na którym miejsce pracy górnika w ścianie {3,5} oznaczono dodatkowym węzłem (4). Zakładamy, że w przypadku powstania zagrożenia w ścianie lub w najbliższym sąsiedztwie wywołanego przez zawał, pożar lub wybuch - wycofanie się górnika do węzła (3) lub (5) nie polepsza jego sytuacji. Dopiero osiągnięcie węzłów (2) lub (6) zmniejsza zagrożenie, a wycofanie się do węzłów (1) lub (7) całkowicie je likwiduje. Dojście do węzłów (2) lub (6) może być jednak utrudnione lub niemożliwe, jeśli uszkodzeniu ulegną chodniki przyścianowe. Obecność trzeciego wyjścia, w przypadku układu przewietrzania Y (rys. 7.11b), lub nawet czwartego wyjścia, w przypadku układu przewietrzania H (rys. 7.11c) znacząco ułatwia ewakuowanie się górnika poza niebezpieczną strefę.



Rys. 7.11. Wpływ dodania trzeciego (b) oraz czwartego (c) wyjścia ze ściany na zwartość utworzonej struktury oddziału eksploatacyjnego

Wykorzystując liczbę zwartości $\bar{z}(S)$ możemy ocenić ilościowo poszczególne przypadki zabezpieczenia strukturalnego dla ściany:

a) układ U $\bar{z}(S_a) = \frac{2(7 - 7 + 1)}{(7 - 1)(7 - 2)} = 0,066$

b) układ Y $\bar{z}(S_b) = \frac{2(8 - 7 + 1)}{(7 - 1)(7 - 2)} = 0,133$

c) układ H $\bar{z}(S_c) = \frac{2(9 - 7 + 1)}{(7 - 1)(7 - 2)} = 0,200$

Przypadek (c) zabezpieczenia - odpowiadający zastosowaniu układu przewietrzania H - jest więc najkorzystniejszy.

7.4. Ocena efektywności funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni

Prawidłowe funkcjonowanie systemu wentylacyjnego polega na stałym zabezpieczeniu pożądanego stanu atmosfery kopalnianej. Niewypełnianie tej funkcji dla całości kopalni lub jej części oznacza uszkodzenie systemu lub podsystemu wentylacyjnego.

W projektowaniu i eksploatacji systemów wentylacyjnych kopalń nie uwzględnia się zagadnienia niezawodności ich działania. Projekt przewietrzania kopalni lub jej części zawiera obliczenia zapotrzebowania powietrza, zainstalowanej mocy wentylatorów, pożądanego rozpiętu powietrza i rozkładu strat naporu w całej sieci wyrobisk. Rozpatrywane są warianty przewietrzania oparte na analizie techniczno-ekonomicznej. Nie analizuje się natomiast rozczinki pola eksploatacyjnego dla całego okresu wybierania tego pola, nie zwraca się uwagi na rozmieszczenie urządzeń wentylacyjnych. Zakłada się ogólnie, że system wentylacyjny powinien być niezawodny, ale nie ustala się przy tym postulatów dotyczących rodzaju i wartości wskaźników niezawodności, jakim dany system powinien odpowiadać. W konsekwencji systemy wentylacyjne kopalń i ich oddziałów są zawodne w mniejszym lub większym stopniu, a przy tym nie jest znane prawdopodobieństwo powstania awarii. Projektowanie niezawodnych systemów wentylacyjnych jest tym bardziej utrudnione, że poszczególne elementy w systemie powstają, są eksploatowane, a następnie likwidowane, natomiast system jako całość trwa i rozwija się bez końca.

Dla ilościowego opisu uszkodzeń systemu wentylacyjnego można wykorzystać model jego struktury funkcjonalno-niezawodnościowej. Najprostszy opis zakłada dwa poziomy jakości funkcjonowania systemu: zdatności do pracy i uszkodzenia. System wentylacyjny traktuje się wtedy jako obiekt niezawodnościowy dwustanowy, podobnie jak przyjmowaliśmy to dla poszczególnych jego elementów, które podlegały uszkodzeniu. System wentylacyjny jest jednakże obiektem wielostanowym, tzn. oprócz stanu zdatności i stanu uszkodzenia posiada stany częściowej zdatności.

Przyjmijmy, że w czasie funkcjonowania systemu wentylacyjnego podlega uszkodzeniom l jego elementów. Przy przyjęciu binarnych zmiennych losowych ξ_i , określających stan elementów uszkodzalnych, system może znajdować się w jednym z 2^l stanów. Generatorem opisu tych stanów systemu może być rozwinięcie iloczynu:

$$\prod_{i=1}^l (p_i + q_i) = 1 \tag{7.7}$$

gdzie:

$$p_i = \Pr\{\xi_i = 1\} - \text{prawdopodobieństwo poprawnej pracy elementu } y_i \in \{y_1, y_2, \dots, y_l\}.$$

$$q_i = \Pr\{\xi_i = 0\} - \text{prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu } y_i, \text{ przy czym: } q_i = 1 - p_i.$$

Prawdopodobieństwo pojawienia się wektora Ξ jako wejścia systemu wyrazić można iloczynem:

$$\Pr\{\Xi\} = \prod_{i=1}^j q_i \prod_{i=j+1}^l p_i \tag{7.8}$$

w którym wskaźnik j przebiega zbiór liczb $\{0, 1, 2, \dots, l\}$ zgodnie z kombinacją $\binom{l}{j}$ wyrażoną przez trójkąt Pascala. Mamy bowiem następującą liczbę stanów:

$$c = \sum_{j=0}^l \binom{l}{j} = 2^l \tag{7.9}$$

W każdym ze stanów Ξ_1 stopień, w jakim realizowane jest globalne zadanie systemu wentylacyjnego, czyli dostarczenie odpowiedniej ilości powietrza do odbiorów z_j , może być scharakteryzowany wielkością względną w_1 nazywaną wskaźnikiem efektywności systemu w i-tym stanie. Wskaźnik efektywności określony może być na podstawie wartości dopływu powietrza do odbiorów z_j , wartości uzyskiwanego zysku, stopnia zaspokojenia odbiorów i tym podobnych wielkości pozwalających ocenić jakość zadania wykonywanego przez system wentylacyjny.

W praktyce eksploatacyjnej nie wiadomo, w którym stanie będzie znajdował się system w chwili t, a więc jako wskaźnik jego efektywności wykorzystywać trzeba wartość oczekiwaną E(W). Ponieważ mamy do czynienia ze skończoną liczbą stanów systemu, to wartość oczekiwaną wskaźnika efektywności obliczymy jak dla zmiennej losowej skokowej:

$$E(W) = \sum_{i=1}^c w_i \Pr\{\Xi_i\} \tag{7.10}$$

gdzie:

$\Pr\{\Xi_i\}$ - prawdopodobieństwo znalezienia się systemu w stanie Ξ_i ,

c - liczba stanów systemu ($c = 2^l$),

w_i - wskaźnik efektywności systemu w stanie Ξ_i .

Wykorzystanie wzoru (7.10) utrudnione jest przez ogromną liczbę stanów systemu, dla których należy obliczyć wskaźniki efektywności i prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Autorzy zajmujący się problematyką innych systemów inżynierskich, np. energetycznych, elektrycznych, hydraulicznych, ograniczają liczbę stanów systemu odrzucając stany obejmujące łączne uszkodzenia dwóch, trzech i więcej elementów lub stosując różne sposoby grupowania elementów.

Najbardziej prawdopodobnymi stanami systemu są: stan pełnej zdatości oraz stany charakteryzujące się jednym uszkodzeniem. Można przy tym przyjąć, że z prawdopodobieństwem równym $(1 - \epsilon)$ stany, w którym uszkodzone są dwa lub więcej elementów, nie zmniejszają jakości działania systemu, zaś z prawdopodobieństwem ϵ powodują uszkodzenie całego systemu. Istnieje jednak możliwość zmniejszenia liczby stanów niezawodnościowych systemu wentylacyjnego dzięki utożsamieniu wielu stanów ze względu na równą wartość wskaźnika efektywności.

Określimy zmienną losową r jako liczbę jednocześnie uszkodzonych odbiorów z_j w systemie wentylacyjnym. Jest to możliwe po przyjęciu założenia, że odbiory są między sobą równoważne. Uzyskamy wtedy następujące stany niezawodnościowe systemu wentylacyjnego ze względu na zmienną losową r :

- δ_0 - gdy $r = 0$, brak uszkodzonych odbiorów.
- δ_1 - gdy $r = 1$, jeden odbiór uszkodzony.
- δ_2 - gdy $r = 2$, dwa odbiory uszkodzone.
- \vdots
- δ_k - gdy $r = k$, wszystkie odbiory uszkodzone.

Zmniejszyliśmy więc liczbę stanów w porównaniu do liczby 2^k na skutek sumowania stanów charakteryzujących się jednakową liczbą uszkodzonych odbiorów.

Zatem

$$\Pr \{A_r\} = \sum_{i=1}^{(k)} \Pr \{W_{ij}\} \quad (7.11)$$

Jako wskaźnik efektywności stanu δ_r przyjmujemy z kolei:

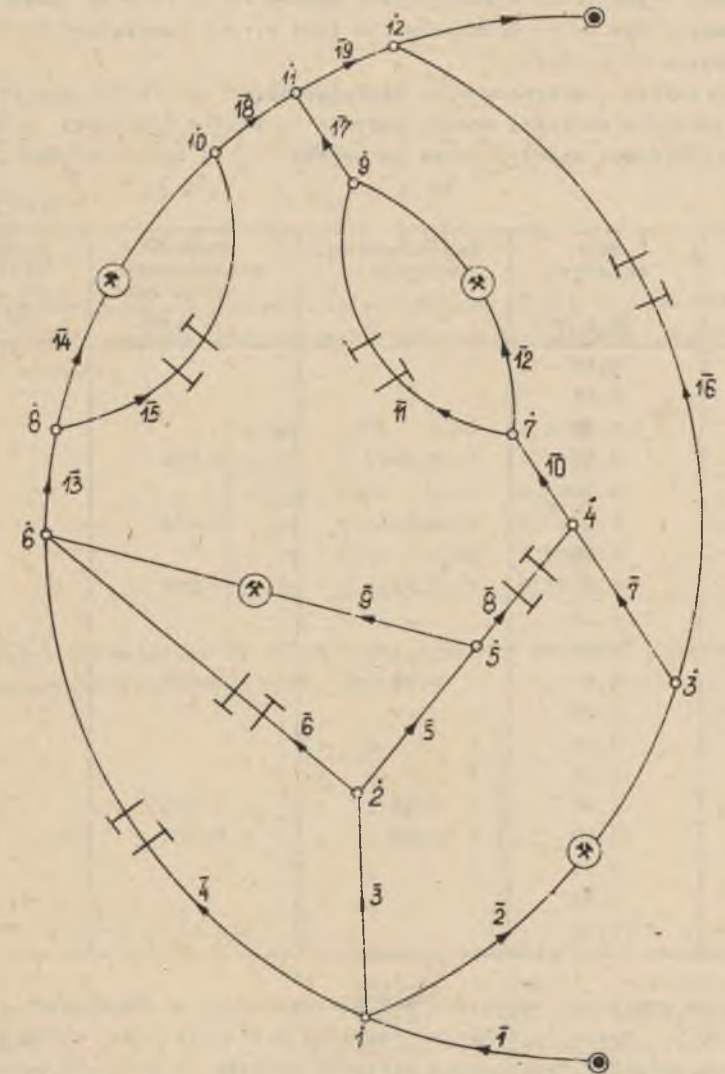
$$w_r = \frac{k-r}{k} \quad (7.12)$$

Wtedy wzór (7.10) na efektywność systemu wentylacyjnego przyjmie postać:

$$E(W) = \sum_{r=0}^k \frac{k-r}{k} \Pr \{\delta_r\} \quad (7.13)$$

Stany $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_k$ także tworzą zupełny układ zdarzeń, a więc z tego względu zawsze mamy:

$$\sum_{r=0}^k \Pr \{\delta_r\} = 1 \quad (7.14)$$



rys. 7.12. Schemat kanoniczny przykładowej sieci wentylacyjnej

Ponieważ praktycznie wystarczające będzie rozpatrywanie uszkodzeń łącznych najwyżej dla dwóch elementów, to lewa strona powyższego równania będzie mniejsza od jedności.

Jako przykład rozpatrzmy sieć wentylacyjną z rys. 7.12, dla której zadano następujące wartości oporów bocznic (w stanie zdatności i uszkodzenia) oraz wartości współczynnika gotowości K_g i intensywności uszkodzeń λ :

Nr bocznicy	Opór bocznicy [N.s ² /m ⁸]	Współczynnik gotowości K_g	Dobowa intensywność uszkodzeń λ [1/d]	Przewidywany opór bocznic po uszkodz. [N.s ² /m ⁸]
1	0,10			
2	0,12			
3	0,10			
4	2,60	0,98	0,006	0,26
5	0,20			
6	5,13	0,94	0,004	0,51
7	0,06			
8	4,88	0,95	0,006	0,49
9	0,10			
10	0,82			
11	2,10	0,95	0,008	0,21
12	0,35			
13	0,24			
14	0,62			
15	2,40	0,92	0,010	0,24
16	10,00	0,99	0,005	1,00
17	0,93			
18	0,23			
19	0,40			

Przepływ powietrza wymuszony był wentylatorem o charakterystyce $\Delta p = 520 - 16 \dot{V}$. W wyniku obliczeń rozpiływu powietrza dla stanu bezuszkodzeniowego uzyskano następujące wartości wydatku w czterech wyróżnionych odbiorach:

- odbiór z_1 (bocznic 2): $\dot{V}_1 = 0,59 \text{ m}^3/\text{s}$
- odbiór z_2 (bocznic 9): $\dot{V}_2 = 5,53 \text{ m}^3/\text{s}$
- odbiór z_3 (bocznic 12): $\dot{V}_3 = 4,20 \text{ m}^3/\text{s}$
- odbiór z_4 (bocznic 14): $\dot{V}_4 = 6,21 \text{ m}^3/\text{s}$.

Przyjęto, że dopuszczalne obniżenie się wartości wydatku w odbiorze w stosunku do stanu bezuszkodzeniowego, wynosi 20% a podwyższenie 50%. Za-

tem graniczne wartości zapotrzebowania powietrza w odbiorach analizowanej sieci wynoszą:

$$z_1: [\dot{V}_{1/\min} = 7,67 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_{1/\max} = 14,39]$$

$$z_2: [\dot{V}_{2/\min} = 4,42 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_{2/\max} = 8,29]$$

$$z_3: [\dot{V}_{3/\min} = 3,36 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_{3/\max} = 6,30]$$

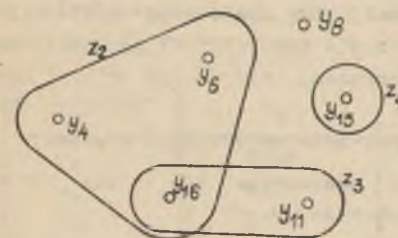
$$z_4: [\dot{V}_{4/\min} = 4,97 \text{ m}^3/\text{s}, \dot{V}_{4/\max} = 9,31]$$

Po przeprowadzeniu obliczeń rozpiływu powietrza dla zmienianych kolejno oporów bocznic uszkodzalnych uzyskano następującą macierz wydatków dla odbiorów w sieci:

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} 8,87 & 3,30 & 4,13 & 6,37 \\ 9,31 & 3,97 & 4,17 & 6,28 \\ 9,50 & 5,49 & 4,21 & 6,20 \\ 9,65 & 5,47 & 2,63 & 6,15 \\ 9,55 & 6,02 & 3,95 & 3,83 \\ 12,92 & 4,28 & 3,13 & 5,17 \end{bmatrix}$$

Zgodnie z określeniem (5.19) macierz wydatków może być zastępowana macierzą zmiennych logicznych wyjściowych:

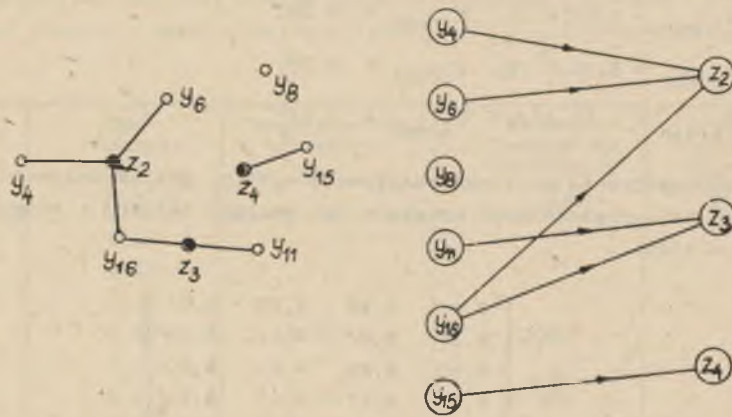
$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Rys. 7.13. Hipergraf odwzorowujący powiązania funkcjonalne w systemie wentylacyjnym utworzonym dla sieci z rys. 7.12

Macierz tę interpretujemy jako binarna macierz incydencji hipergrafu H , w której 1 wierszom odpowiadają wierzchołki hipergrafu, natomiast k kolumnom odpowiadają hiperkrawędzie. Elementy "0" oznaczają przynależność do hiperkrawędzi. Uzyskany hipergraf przedstawia 7.13. Relacje między wierzchołkami a hiperkrawędziami są poszukiwanymi powiązaniem funkcjonalnymi w systemie. Po przekształceniu hipergrafu w graf liniowy (rys. 7.14) otrzymaliśmy graf dwudzielny Königa odwzorowujący tym samym strukturę funkcjonalną

rozpatrywanego systemu wentylacyjnego. Na podstawie uzyskanej struktury funkcjonalnej możemy z kolei odtworzyć tablicę zmiennych logicznych wejściowych zakładając, że możliwe są jednoczesne uszkodzenia najwyższej dwóch bocznic.



Rys. 7.14. Graf dwudzielny odwzorowujący strukturę funkcjonalną rozpatrywanego systemu wentylacyjnego

Dla przedstawienia ogólnego sposobu odtwarzania tablicy wejściowej systemu wykorzystamy fakt, że struktura funkcjonalna tworzy graf dwudzielny. W grafie dwudzielnym istnieją połączenia tylko między wierzchołkami zbiorów Y i Z, nie występują natomiast między wierzchołkami tego samego zbioru. Dla wierzchołka y_i wierzchołkiem sąsiadnym będzie tylko wierzchołek z_j . Zdefiniujemy ogólniejsze pojęcie zbioru-sąsiedztwa. Sąsiedztwem dowolnego podzbioru Y' zbioru Y nazywać będziemy podzbiór tych elementów z_j zbioru Z, które posiadają w grafie krawędzie łączące je z elementami zbioru Y' . Sąsiedztwem podzbioru Y' - oznaczanym przez $N(Y')$ - będzie więc podzbiór Z' . Dwa sąsiedztwa $N(Y') = Z'$ i $N(Y'') = Z''$ są równoliczne, jeśli zawierają tę samą liczbę elementów. Dwa sąsiedztwa $N(Y') = Z'$ i $N(Y'') = Z''$ są identyczne, jeśli dla $Y' \subset Y''$ lub $Y'' \subset Y'$ zachodzi równość $Z' = Z''$. Sąsiedztwo określone dla podzbioru $Y' \subset Y$ lub $Y'' \subset Y$ nazywane jest dalej - minimalnym.

Określimy następujący algorytm wyboru wektorów wejściowych systemu:

Krok 1. Znaleźć w grafie dwudzielnym $K(H)$ sąsiedztwa $N(y_i)$ dla pojedynczych wierzchołków y_i należących do zbioru Y.

Krok 2. Brać kolejno kombinacje par elementów (y_i, y_j) , trójek, czwórek ..., aż do (y_1, y_2, \dots, y_n) i określać ich sąsiedztwa minimalne. Na skutek dużej liczby powiązań między wierzchołkami grafu $K(H)$ wybór kombinacji jest bardzo ograniczony.

Krok 3. Uporządkować sąsiedztwa minimalne $N(Y') = Z'$ na klasy K_i , zaliczając do jednej klasy sąsiedztwa równoliczne. Klasy uporządkowane według wzrastającej liczności sąsiedztw, odpowiadają stanom niezawodnościowym $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_k$.

W rozpatrywanym przykładzie określimy sąsiedztwa pojedynczych wierzchołków oraz par wierzchołków. Zauważmy też, że dla bocznic uszkodzalnej y_8 sąsiedztwo jest podzbiorem pustym i nie będziemy go uwzględniać w dalszej analizie przykładowego systemu.

Po uporządkowaniu wektorów stanów bocznic uszkodzalnych uzyskujemy następującą tablicę zmiennych logicznych wejściowych:

Stany bocznic uszkodzalnych	Nr wektora stanu bocznic uszkodzalnych	Stan niezawodnościowy uszkodzalnego systemu
$y_4 \ y_6 \ y_{11} \ y_{15} \ y_{16}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	δ_r
1 1 1 1 1	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	δ_0
1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}$	δ_1
1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1	$\begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{bmatrix}$	δ_2
1 1 1 0 0	$\begin{bmatrix} 12 \end{bmatrix}$	δ_3

Dla poszczególnych bocznic podlegających uszkodzeniu obliczymy niezawodność ich funkcjonowania w okresie $\tilde{t} = 30$ dni zgodnie ze wzorem (5.7):

Nr bocznic	K_g	$\lambda [1/d]$	$\lambda \cdot \tilde{t}$	R
y_4	0,98	0,006	0,18	0,82
y_6	0,94	0,004	0,12	0,83
y_{11}	0,95	0,008	0,24	0,75
y_{15}	0,92	0,010	0,30	0,68
y_{16}	0,99	0,005	0,15	0,85

Korzystając ze wzoru (7.8) obliczamy prawdopodobieństwo pojawienia się wektora \underline{x}_1 na wejściu systemu oraz korzystając ze wzoru (7.11) obliczamy prawdopodobieństwo wystąpienia stanu Δ_r systemu:

$$\begin{aligned} \Pr \{ \underline{x}_1 \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,295 \\ &\Pr \{ \Delta_0 \} = 0,295 \\ \Pr \{ \underline{x}_2 \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,32 \cdot 0,85 = 0,139 \\ \Pr \{ \underline{x}_3 \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,098 \\ \Pr \{ \underline{x}_4 \} &= 0,18 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,065 \\ \Pr \{ \underline{x}_5 \} &= 0,82 \cdot 0,17 \cdot 0,75 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,060 \\ &\Pr \{ \Delta_1 \} = 0,362 \\ \Pr \{ \underline{x}_6 \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,68 \cdot 0,15 = 0,052 \\ \Pr \{ \underline{x}_7 \} &= 0,18 \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,022 \\ \Pr \{ \underline{x}_8 \} &= 0,82 \cdot 0,17 \cdot 0,25 \cdot 0,68 \cdot 0,85 = 0,020 \\ \Pr \{ \underline{x}_9 \} &= 0,18 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,32 \cdot 0,85 = 0,030 \\ \Pr \{ \underline{x}_{10} \} &= 0,82 \cdot 0,17 \cdot 0,75 \cdot 0,32 \cdot 0,85 = 0,028 \\ \Pr \{ \underline{x}_{11} \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot 0,32 \cdot 0,85 = 0,046 \\ &\Pr \{ \Delta_2 \} = 0,198 \\ \Pr \{ \underline{x}_{12} \} &= 0,82 \cdot 0,83 \cdot 0,75 \cdot 0,32 \cdot 0,15 = 0,024 \\ &\Pr \{ \Delta_3 \} = 0,024 \end{aligned}$$

Suma obliczonych prawdopodobieństw wynosi 0,879, a więc brakująca do jedności wartość 0,121 odpowiada nie uwzględnionym 20 stanom bocznic uszkodzalnych o mniejszym znaczeniu.

Efektywność rozpatrywanego systemu wentylacyjnego z czterema odbiorami powietrza dla okresu 30 dni jego funkcjonowania wynosi więc zgodnie ze wzorem (7.13):

$$E(W) = 1 \cdot 0,295 + \frac{3}{4} \cdot 0,362 + \frac{2}{4} \cdot 0,198 + \frac{1}{4} \cdot 0,024 = 0,671$$

8. ZAKOŃCZENIE

8.1. Wnioski końcowe

1. Dla odwzorowania struktury topologicznej kopalnianej sieci wentylacyjnej wykorzystywać należy schematy wentylacyjne rozmyte będące reprezentacją geometryczną multigrafu rozmytego zdefiniowanego za pomocą zbiorów i relacji rozmytych Zadeha [160]. Pozwalają one na odwzorowanie również wyrobisk nie w pełni zlikwidowanych oraz różnego rodzaju szczelin, którymi płynie powietrze lub gazy. Wybór funkcji przynależności bocznic do schematu rozmytego, mimo że subiektywny w ogólnym przypadku, oparty może być na wartości przepływu powietrza przez wyrobiska, zroby lub szczeliny, a także na wartościach ich oporów aerodynamicznych.

2. Możliwe jest przedstawienie funkcji przynależności bocznic do struktury rozmytej za pomocą wartości stopni wyrażonych graficznie, jeśli jej polem jest zbiór liczb wymiernych. Dla celów praktycznych kod graficzny zawierać może kilka znaków zastosowanych dla klas bocznic. Klasy te można określić kierując się funkcją, budową i rodzajem wyrobiska, otworu czy szczeliny jako drogi przepływu powietrza lub gazów.

3. Dla odwzorowania pól pożarowych, zrobów, kompleksów wyrobisk czasowo otamowanych, które łączą się w kilku (a nawet w kilkunastu) miejscach z innymi elementami sieci wentylacyjnej posługiwać się należy hiperbocznicami - będącymi reprezentacją geometryczną relacji wieloczłonowych. Uogólnieniem schematu kanonicznego dla relacji wieloczłonowych jest hiperschemat kanoniczny, który również może być interpretowany jako rozmyty. Przekształcenie topologiczne hiperschematu kanonicznego w schemat kanoniczny liniowy (poprzez formę grafu blokowego) umożliwia prawidłową analizę rodzaju połączeń w sieci wentylacyjnej.

4. Odwzorowaniem przepływowej struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej jest schemat lub hiperschemat kanoniczny rozmyty z funkcjami zadanymi na zbiorach węzłów i bocznic (hiperbocznic). Z określonych w ten sposób funkcji przepływowej i potencjalnej sieci wynika, że pomiędzy wszystkimi węzłami sieci wentylacyjnej zrealizowany jest przepływ maksymalny. Kopalniana sieć wentylacyjna jest więc siecią z maksymalnymi przepływami wielokierunkowymi w sensie definicji Forda-Fulkersona [50].

5. Odwzorowaną strukturę przepływową sieci wentylacyjnej można podzielić na takie dwie sieci wielobiegunowe, z których jedna jest dendrytem a druga antydendrytem odpowiednio homeomorficznie przekształconej sieci po-

czątkowej. Jeśli struktura sieci nie zawiera niezależnych cykli wewnętrznych, to wspomniane trzy sieci, a więc początkowa i utworzone z niej sieci wielobiegunowe, są równoważne przepływowo, tzn. wydatki dowolnego przekroju kanonicznego Barczyka są w nich równe. W sieciach o strukturze zawierającej cykle niezależne wewnętrzne występuje natomiast identyczność wektora prądów niezależnych sieci początkowej z wektorem wydatków źródeł sieci wielobiegunowych. Właściwości te umożliwiają wykorzystanie planarności sieci-dendrytu do konstruowania schematów ilościowych i uzasadniają stosowanie sieci rozszczepionych Apriligo [7] w niektórych metodach obliczeniowych.

6. Przy odwzorowywaniu przepływowej struktury sieci wentylacyjnej konieczne jest ustalenie orientacji jedynie w bocznicach przekątnych, gdyż wyróżnienie źródła i odpływu w sieci nie wyróżnia w sposób jednoznaczny krańców bocznic przekątnej. Jednoznaczne ustalenie orientacji danej bocznic w sieci uzyskuje się na podstawie tzw. rozkładu kanonicznego Wietchniewskiego [15]. Charakter bocznic, a więc i prądu powietrza z nią związanego, jest bowiem właściwością względną (zależną od wyróżnienia biegunów sieci) dla wszystkich sieci poza sieciami nierozkładałnymi.

7. Dla wykrywania planarności odwzorowanej sieci wentylacyjnej można posłużyć się sieciami kryterialnymi S_{α} , S_{β} , S_{γ} będącymi odpowiednio zmodyfikowanymi grafami Kuratowskiego [8]. Badania planarności wykorzystać można w celu odwikłania schematów kanonicznych powikłanych w czasie odwzorowywania struktury topologicznej sieci.

8. Strukturę funkcjonalną systemu wyraża funkcja przetwarzająca zmiany oporów bądź charakterystyk bocznic podlegających wymuszeniu na zmiany wydatków prądów w bocznicach stanowiących odbiory powietrza. Można ją efektywnie wyznaczyć pod warunkiem, że system wentylacyjny potraktuje się jako system logiczny kombinacyjny, w którym elementy charakteryzujące wejście, jak również elementy charakteryzujące wyjście, opisane są zmiennymi logicznymi.

9. Wyznaczanie struktury funkcjonalnej polega na uściśleniu, drogą obliczeń symulacyjnych, postaci zorientowanego grafu dwudzielnego Kóniga, w którym dwa podzbiory wierzchołków są odpowiednio bocznicami podlegającymi wymuszeniu oraz bocznicami stanowiącymi odbiory powietrza, a łuki wyrażają więź funkcjonalną między nimi.

10. Strukturę niezawodnościową systemu wentylacyjnego należy wyznaczać opierając się na jego strukturze funkcjonalnej, a nie strukturze topologicznej lub przepływowej. Równocześnie konieczne jest sprecyzowanie warunków realizowalności celu systemu.

11. Porównywanie rozmytych struktur topologicznych bądź przepływowych odwzorowanych sieci wentylacyjnych powinno być dokonywane przy określonym α -obciążeniu sieci. Dwie sieci wentylacyjne rozmyte mogą być bowiem topolo-

gicznie identyczna na danym poziomie $\alpha \in [0,1]$, mimo ich różnego obrazu geometrycznego. Można ten wynik interpretować jako identyczność własności dwóch sieci w warunkach normalnego przewietrzania, a odmienną własności w sytuacji awaryjnej, kiedy to ich struktury muszą być rozpatrywane "bardziej szczegółowo".

12. Ocenę złożoności struktury sieci wentylacyjnej można oprzeć na wyprowadzonej liczbie złożoności G wykorzystując zaproponowane cztery klasy złożoności. Struktury sieci kopalń rzeczywistych, odwzorowanych dla celów obliczeniowych w postaci schematu kanonicznego, ocenić należy jako bardzo złożone (klasy IV).

13. Ocenę zwartości struktury sieci wentylacyjnej można oprzeć na wyprowadzonej liczbie zwartości Z wykorzystując zaproponowane również cztery klasy zwartości. Struktury sieci kopalń rzeczywistych ocenić należy jako bardzo słabo zwarte (klasy I).

14. Wyprowadzone liczby złożoności G i zwartości Z są odmianami naturalnej, podstawowej miary złożoności grafu, jaką jest jego gęstość. Mogą one być wykorzystane również w teorii grafów do analizy realizowalności grafów o określonych własnościach.

15. Opracowane metody odwzorowania i miary struktur kopalnianej sieci wentylacyjnej mogą znaleźć zastosowanie przy analizie awaryjnych sytuacji pożarowych lub gazowych w kopalniach, projektowaniu oddziałów eksploatacyjnych o dużym bezpieczeństwie strukturalnym, a także przy projektowaniu racjonalnych i efektywnych systemów wentylacyjnych kopalń.

8.2. Uwagi końcowe

Praca uzasadnia potrzebę odrzucenia przeświadczenia co do możliwości wiernego odwzorowania topologicznej bądź przepływowej struktury sieci wentylacyjnej kopalni; na wzór innych sieci technicznych. Coraz dokładniejsze modele struktury uzyskiwać będzie można przy traktowaniu sieci wentylacyjnej jako sieci rozmytej i uściśleniu wartości stopnia przynależności różnych jej elementów. Może nasuwać się pytanie, czy możliwe jest tak dokładne odwzorowanie elementów sieci wentylacyjnej, jak to zakłada się w rozważaniach teoretycznych. Odpowiedzi udzielić może oczywiście tylko technika pomiarowa. Od wielu lat znana jest technika gazów znaczonych (np. zastosowanie SF_6), za pomocą której wykrywa się drogi przepływu powietrza i gazów w niedostępnych miejscach kopalni i mierzy się nawet bardzo małe wydatki przepływów. Również i w Polsce rozpoczęto wykorzystywać w tym samym celu gazy znaczone, a dalsze prace na pewno rozwiną tę technikę pomiarową.

Z drugiej strony praca uzasadnia potrzebę spojrzenia na sieć wentylacyjną jako na system podobny do innych systemów technicznych, wykazu-

możliwość identyfikacji jego struktury funkcjonalnej. Podejście systemowe wymaga oczywiście znowu szerokiej informacji o funkcjonowaniu poszczególnych elementów sieci wentylacyjnej i znajomości warunków działania całego systemu wentylacyjnego. Informacje te uzyskać można drogą badań niezawodnościowych, również stopniowo rozwijających się w kopalniach węgla i rud.

Autor wyraża przeświadczenie, że praca poszerzając wiedzę o odwzorowaniu i miarach struktury sieci wentylacyjnej otwiera ważny kierunek dalszych badań w teorii sieci wentylacyjnej, sięgający po nowe wyniki dyscyplin podstawowych i pokrewnych, rozbudzający potrzebę rozwoju nowych technik pomiarowych w wentylacji kopalń i umożliwiający praktyczne wykorzystanie osiągniętych rezultatów.

LITERATURA

- [1] Abramov F.A. i inni: Rasčot ventilacionnych sietiej šacht i rudnikov. Nedra, Moskwa 1978.
- [2] Abramov F.A. i inni: Vozduchoraspriedielenije v vientilacionnych sietiach šacht. Naukova dumka, Kijev 1971.
- [3] Abramov N.N.: Teorija i metodika rasčota sietiam podači i raspriedielenija vody. Stroizdat., Moskwa 1972, s. 228.
- [4] Adamkiewicz W. i inni: Algorytmizacja relacji systemotwórczej w projektowaniu integralnym. Prace Naukowe ICT Pol. Wr., s. Konf. nr 7, Wrocław 1973.
- [5] Aggarwal K.K. i inni: Reliability Evaluation a Comparative Study of Different Techniques. Microelectron. Reliab., t. 14, nr 1/1975.
- [6] Apraksin Ju.K., Kiriuchin V.V.: Algoritm opriedielenija ocenok nadieżnosti diskretnych upravljajuščich sietiam. AVT, nr 5/1973, s. 37-39.
- [7] Aprile G.: Il metodo delle correnti parziali, nel calcolo dei circuiti di ventilazione mineraria. L'Industria Mineraria, giugno 1958.
- [8] Aprile G.: La "rappresentazione rettangolare" per le reti di ventilazione mineraria. L'Industria Mineraria, maggio 1969, s. 215-216.
- [9] Ashby W.R.: Wstęp do cybernetyki. PWN, Warszawa 1963.
- [10] Avondo-Bodino G.: Economic applications of the theory of graphs. Urbino 1962. Tłum. ros. Mir, Moskwa 1966.
- [11] Bagrinovskij A.D.: Osnovy teorii upravlenija šachtnymi vientilacionnymi sietiami. IGD, Leningrad 1964.
- [12] Bankin S.S.: Razrabotka metoda ocenki i povyšenijs nadieżnosti šachtnych ventilacionnych sietiej. Avtoref. diss., Kemerovo 1977.
- [13] Barczyk S.: Odwracanie się głównego prądu powietrza przy pożarach we wznoszącym się prądzie. Arch. Gór. i Hutn. nr 4/1954, s. 489-512.
- [14] Baron B.: O pewnych własnościach macierzy sieciowej. ZN Pol. Śl., s. Elektryka z. 50, 1975.
- [15] Bellert S., Woźniacki H.: Analiza i synteza układów elektrycznych metodą liczb strukturalnych. WNT, Warszawa 1968.
- [16] Berge C.: Théorie des graphes et ses applications. Dunod, Paris 1958. Tłum. ros. Mir, Moskwa 1962.
- [17] Berge C.: Graphes and Hypergraphes. Dunod, Paris 1970.
- [18] Bertalanffy L. von: Historia rozwoju i status ogólnej teorii systemów. Ogólna teoria systemów. Tendencje rozwojowe. Pr. zb. Red. G.J. Klir. WNT, Warszawa 1976, s. 27-47.
- [19] Billinton R., Grover M.S.: A sequential method for reliability analysis of distribution and transmission systems. Proc. 1975 Ann. Reliab. and Mainten. Symp. 28-30 Jan. 1975, Washington, s. 460-469.
- [20] Bładowski S.: Metody sieciowe w planowaniu i organizacji pracy. PWE, Warszawa 1970.
- [21] Bojaraki W.W.: Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych, PWN Warszawa 1967.

- [22] Bołtianski W.G., Jefremowicz W.A.: Zarys podstawowych pojęć topologii. PZWS - EM, Warszawa 1965, s. 41-48.
- [23] Borsuk K.: Sur les rétractes. Fundamenta Mathematicae, 17, 1931, s. 152-170.
- [24] Budryk W.: Odwracanie się prądów powietrznych w czasie pożarów podziemnych i sposoby zapobiegania. Arch. Gór.-Hutn. t. II, z. 2, 1954.
- [25] Budryk W.: Naukowe zasady prowadzenia akcji przeciwpożarowej w kopalniach. Przegl. Gór.-Hutn., Nr 2, 3, 4, 1930.
- [26] Budryk W.: Wentylacja kopalń, Cz. 1. Śląsk Katowice 1961.
- [27] Buslenko N.P. i inni: Teoria systemów złożonych. PWN, Warszawa 1979.
- [28] Bystron H.: Plany i schematy przewietrzania. Mat. Konf. n/t. Prawidłowe przewietrzanie podstawą bezpiecznej i wydajnej pracy w kopalniach. SITG, Staliność 1956, s. 62-74.
- [29] Bystron H.: Sposób kreślenia kanonicznych schematów przewietrzania. Przegl. Górniczy, nr 3, 1956, s. 86-100.
- [30] Bystron H.: Metoda modelowa wyznaczania rozpiętu powietrza w specjalnych sieciach wentylacyjnych. Prace Nauk. Inst. Gór. Pol. Wr., s. Studia i Mat., nr 3, Wrocław 1970, s. 177-207.
- [31] Bystron H.: Metody modelowe wyznaczania rozpiętu powietrza w aktywnych sieciach wentylacyjnych. Przegl. Górniczy, nr 10, 1970, s. 428-451.
- [32] Bystron H.: Rekurencyjna metoda modelowa wyznaczania rozpiętu powietrza w pasywnych sieciach wentylacyjnych. Przegl. Górniczy, nr 9, 1970.
- [33] Bystron H.: Zastosowanie schematu potencjalnego do analizy bezpieczeństwa sieci wentylacyjnej. Przegl. Górniczy, nr 3, 1971.
- [34] Bystron H.: Podstawy schematu potencjalnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace GIG, Komunikat nr 471, Katowice 1969.
- [35] Bystron H.: Stabilność prądów schodzących a profilaktyka katastrof górniczych. Arch. Górniczy, t. 23, z. 3, 1977.
- [36] Cegielski M., Florek K.: Metoda maksymalizacji zwartości systemu elektroenergetycznego. Prace Naukowe IEl Pol. Wr. s. Studia i Mat. nr 23, Wrocław 1975.
- [37] Christofides N.: Graph theory. An algorithmic approach. Ac. Press Inc. London 1975. J. ros., Mir, Moskwa 1978.
- [38] Ciesielski J.: Przegląd metod odwzorowania geometrycznej budowy sieci wodociągowych z punktu widzenia zastosowań EMC. Arch. Hydrotechn., t. XXIII, z. 2, 1976.
- [39] Coj S., Rogov E.J.: Osnovy teorii ventilacionnych sietiej. Nauka, Alma-Ata 1965.
- [40] Coj S.: Avtomatičeskoje upravlenie ventilacionnymi sistiemami šacht. Nauka, Alma-Ata 1975.
- [41] Czechowicz J.: Zwalczenie pożarów w kopalniach silnie metanowych. Śląsk, Katowice 1972.
- [42] Czeczott H.: Teoria prądów przekątnych. Prace AG, z. 1, Kraków 1925.
- [43] Czeczott H.: Przewietrzanie robót podziemnych w kopalni Saturn. Przegląd Gór.-Hutn., nr 1, 2, 7-12, 1905.
- [44] Czogała E., Czaja-Pośpiech D.: O pewnej koncepcji optymalizacji opartej na teorii zbiorów rozmytych. ZN Pol. Śl. s. A. Informatyka, z. 40, 1978.
- [45] Czogała E., Redrycz W.: Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych. Skr. Pol. Śl. nr 989, Gliwice 1980.
- [46] Dao N.: Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. PWN, Warszawa 1980.

- [47] Dubrowskij L.K.: Sostojanije tiechničeskich sistiem i diagnostika. "Diagnostika i ident.", Zinatnja, Riga 1974, s. 95-99.
- [48] Engl W.L. i inni: Theory of Multiplace Graphs. IEEE Trans. Circ. and Syst., vol. CAS - 22, nr 1, 1975.
- [49] Feldman V. Ja: Teoriema o piaskich sietiach. Kibiernietika. Nr 6, 1973, s. 28-33.
- [50] Ford L.R., Fulkerson D.R.: Przepływy w sieciach. PWN, Warszawa 1969.
- [51] Frycz A., Sułkowski J.: Kryterium wyboru metod cyklowych lub węzłowych obliczania kopalnianych sieci wentylacyjnych. ZN Pol. Śl. s. Górniczo z. 65, Gliwice 1974, s. 59-66.
- [52] Frycz A., Sułkowski J.: Wpływ rozczinki pola eksploatacyjnego na niezawodność utworzonego w nim systemu wentylacyjnego oddziału wydobywczego. Przegl. Górniczy, nr 10, 1978, s. 418-423.
- [53] Frycz A., Sułkowski J.: Calculation of the Reliability of the Mine Ventilation System or Subsystem. Second Intern. Vent. Congress. 4-8 Nov. 1979 Reno NV, AIME N.Y. 1980 s. 148-155.
- [54] Gaskarov D.V. i inni: Prognozirovanije tiechničeskogo sostojanija i nadziežnosti radioelektronnoj apparatury. Sov. radio. Moskwa 1974, s. 224.
- [55] Garrison W.L., Marble D.F.: The structure of transportation networks. The Transportation Centre, Northwestern Univ. Evanston I 11, 1962.
- [56] Gładysz S.: Wstęp do topologii. PWN, Warszawa 1981.
- [57] Gładysz B.W. i inni: Metody matematyczne w teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1968.
- [58] Gondran M., Minoux M.: Graphes et algorithmes. Eyrolles, Paris. 1979, ss. 518.
- [59] Gorbатов V.A.: Schiemy upravlenija CVM i grafy. Energijska. Moskwa 1971.
- [60] Gustkiewicz J.: O pewnym modelu kopalnianej sieci wentylacyjnej i jej strukturze. Arch. Górniczy, t. XII, z. 3, 1967.
- [61] Hall A.D.: Podstawy techniki systemów, PWN, Warszawa 1968.
- [62] Harary F., Palmer E.M.: Graphical enumeration. Acad. Press. N.Y. - London, 1973. Tłum. ros., Mir, Moskwa 1977.
- [63] Hilbert D., Cohn-Vossen S.: Geometria poglądowa. PWN, Warszawa 1956, s. 264.
- [64] Ilin W.A.: Wielkie systemy telemechaniki. WNT, Warszawa 1970.
- [65] Józwiak I.J.: Metody analizy sieci komputerowych. Prace Nauk. ICT Pol. Wr., s. Studia i Mat. nr 28, Wrocław 1970.
- [66] Jura Z., Rogowska J.: Statystyczne opracowanie występujących oporów wydatków przepływu i spadków naporu w bocznicach sieci wentylacyjnych kopalń, jako podstawa do ich elektrycznego modelowania. Prace Komisji Nauk Techn., s. Górniczo, z. 4, 1967.
- [67] Kanak K.J.: The structure of transportation networks. Research Paper, nr 84, Univ. Chicago, Dep. Geogr., Chicago 1963.
- [68] Karpiński J.: Wyznaczenie postaci funkcyjnej dystrybuanty czasu poprawnej pracy systemu. Zag. Ekspł. Maszyn. t. 1(29), 1977, s. 91-99.
- [69] Kaszewski M.: Metoda wyznaczania struktury funkcjonalnej obiektu technicznego. Zag. Ekspł. Maszyn vol. 15, z. 2(42), 1980, s. 201-207.
- [70] Kazmierczak J.: System cybernetyczny z zachowaniem celowym. Wiedza Powsz., Warszawa 1978.
- [71] Kiliński A.: Przemysłowe procesy realizacji. Podstawy teorii. WNT, Warszawa 1976.

- [72] Klebanov F.S., Rossočinskij V.I.: O najluchšej topologii šachtnoj vientilacionnoj sieti. Naučn. soobšč. IGD, vyp. 105, Moskwa 1973.
- [73] Klebanov F.S., Naučnyje osnovy konstruirovanija šachtnych vientilacionnych sietiej. XVII Intern. Conf. Mining Safety Research, 3-7 oct. 1977 sect. E-8, Varna 1977, s. 173-178.
- [74] Klir G.J.: Przegląd wstępny. Polifoniczna ogólna teoria systemów. "Ogólna teoria systemów". Red. G.J. Klir, WNT, Warszawa 1976.
- [75] Knothe S.: Obliczanie niezawodności sieci energoelektrycznych w zakładach przemysłowych. Przegl. Elektrotechn. nr 7, 1972.
- [76] Kogon V.R.: Issledovanija parametrov vientilacionnych Źluzov, ustanovlennyh v gorizontalnych gornych vyrabotkach s releovym transportom i ich vlijanije na ustojčivost provietrivanija šacht. Avtoraf. diss., Kuzb. Politechn. Inst., Kemerovo 1977.
- [77] Kolarczyk M.: Własności i zastosowania charakterystyk podsieci i otoczenia w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Dys. dokt. Pol. Śl., Gliwice 1980.
- [78] Komorowski W.: Ocena zawodności chłowej kombinacyjnych układów logicznych. Prace Naukowe ICT Pol. Wr., s. Studia i Materiały, nr 6, Wrocław 1972.
- [79] Komorowski W.: Wpływ uszkodzeń chwilowych na sygnał wyjściowy logicznej sieci kombinacyjnej. Arch. Autom. Telemech. z. 3, 1973.
- [80] Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973.
- [81] Korolckij V.V., Potiemkin V.Ja.: Kriterii adekvatnosti vientilacionnych sietiej rudnikov i ich matematičeskich modielej. "Ochrona truda i tiechnika bezopasn. v gornorudnoj prom-sti", Nedra, Moskwa 1975 s. 63-68.
- [82] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. WNT, Warszawa 1978.
- [83] Korzeń-Chmielowski J.: O niektórych zagadnieniach probabilistyki i teorii zbiorów rozmytych. ZN Pol. Śl. s. Automatyka z. 47, 1979 s. 81-94.
- [84] Kozłow B., Usakov I.: Spravočnik po rasčotu nadiežnosti. Sov. radio Moskwa 1975, s. 223-224.
- [85] Kruszyński M.: Pewne problemy sterowania kopalnianą siecią wentylacyjną. Zesz. Probl. Górn., t. 10, z. 2, 1972, s. 51-64.
- [86] Krzywiec R.K.: Opis wielociągowy systemów mechanicznych. PMTS, Gliwice 1975.
- [87] Kukuczka A.: Modyfikacja rozczinki pól eksploatacyjnych dla możliwości stosowanie kompleksowej metody likwidacji zagrożenia pożarowego. Bezp. Pracy w Górn., nr 4(17), 1972, s. 10-15.
- [88] Kuratowski K.: Sur le problème des courbes gauches en Topologie. Fund. Mathematicae, t. 15, 1930, s. 271-283.
- [89] Kuratowski K.: Wstęp do teorii mnogości i topologii. PWN, Warszawa 1965.
- [90] Kutarba K., Werbowski T.: Optymalizacja struktury niezawodnościowej systemów. XV Symp. "Optymal. w mechanice" PTMT1S, nr 34, Gliwice-Wiśła 1976, s. 233-245.
- [91] Litwiniszyn J.: Przewietrzanie kopalń. Czytelnik, Łódź 1950, s. 37.
- [92] Litwiniszyn J.: Metoda badań i wyniki pracy nad teorią wentylacji. Wybór pism H. Czeozotta. PWN, Warszawa 1957, s. 26-33.
- [93] Litwiniszyn J. i inni: Elektryczny analogon kopalnianych sieci wentylacyjnych. ZN AGH, s. Górnictwo z. 1, 1954.
- [94] Litwiniszyn J.: Metody naukowe badań górniczych. Materiały z Prac Rady (PRC), t. 1, z. 12, WG, Warszawa 1959.

- [95] Litwiniszyn J.: Measure of correspondence between the elements of a set. Certain application of this measure. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. sci. techn., 1. XIII, nr 3 (1965).
- [96] Łatinskij S.M. i inni: Teorija i praktika eksploataciji radiolokacyjnych sistem. Sov. radio, Moskwa 1970.
- [97] Maciejasz Z., Kruk F.: Pożary podziemne w kopalniach. Cz. 1. Śląsk, Katowice 1977.
- [98] Matla R.: Metoda określenia niezawodności stacji elektroenergetycznych. Prace Nauk. PW, s. Elektryka z. 54, Warszawa 1970, s. 35-54.
- [99] Mester J.M., Zasuchin I.N.: Avtomatizacija kontrola i regulirovanija rudničnogo provietrivanija. Nedra, Moskwa 1974.
- [100] Miękus J. i inni: Metoda macierzowa wyznaczania jednoznacznego schematu kanonicznego. Cuprum, nr 5, 1970, s. 14-16.
- [101] Migdalski J.: Metody obliczania niezawodności systemów o strukturach złożonych. Rozpr. Elektr., t. 22, z. 3, 1976, s. 499-541.
- [102] Miasnikov A.A., Pavlov A.F.: Nadiežnost provietrivanija vyjemočnogo učastka. XV Int. Conf. Safety Mines Research, t. II. Karlovy Vary 1973.
- [103] Miasnikov A.A. i inni: Povyšenie nadiežnosti i effektivnosti provietrivanija vyjemočnych polej gazoobilnych šacht. CNIEI - Ugol, Moskwa 1974.
- [104] Mynarski S.: Elementy teorii systemów i cybernetyki. PWN, Warszawa 1979.
- [105] Niederliński A.: Systemy i sterowanie. Skr. Pol. Śl. nr 746, Gliwice 1978.
- [106] Oprzędkiewicz J., Węsiereki W.: Metoda identyfikacji struktury niezawodnościowej systemów technologicznych z zastosowaniem automatu rozgrywającego. Zag. Ekspł. Maszyn. vol. 11, z. 1(25), 1976, s. 67-77.
- [107] Ore O.: Wstęp do teorii grafów. PWN, Warszawa 1966.
- [108] Ośluk R.: Wybrane zagadnienia analizy niezawodnościowej układów energoelektronicznych przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej. Prace Inst. Elektrotechniki, z. 86, Warszawa 1974.
- [109] Patigny J.: Essai d'une nouvelle technique d'étude et de contrôle de la ventilation minière. Annales des Mines de Belgique, Sept. 1971.
- [110] Patrušev M.A., Dranicyn Je.S.: Provietrivanije vysokomechanizirovannyh žav. Donbas, Donieck 1974.
- [111] Patrušev M.A., Karnauch N.V.: Ustojčivost provietrivanija ugolnych šacht. Nedra, Moskwa 1973.
- [112] Pavlovskij V.A., Sułkowski J.: O kriterijach płaskosti grafa šachtnoj vientilacionnoj sieti. Razr. Mest. Polezn. Iskop. vyp. 56. Tiechnika, Kijev 1980, s. 57-62.
- [113] Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J.: Przewietrzanie kopalń. Śląsk, Katowice 1979.
- [114] Petit P.: Etude sur l'aérage des travaux préparatoires dans les mines à grisou. Bull. Soc. L'Ind. Minerale, t. XIV, 1900, s. 762.
- [115] Piątek M., Kuczera J.: Pożar w kopalni Manifest Lipcowy. Bezp. Pracy w Górnictwie, nr 3, 1975.
- [116] Piątek M.: Pożar w kopalni Polkowice. Bezp. Pracy w Górn. nr 4 1979.
- [117] Protodisikonov M.M.: Provietrivanije rudnikov. Gos.Naučn.-Techn.Izd., Moskwa - Lenigred 1931, izd. V.
- [118] Rapoport A.: Zastosowanie izomorfizmu matematycznego w ogólnej teorii systemów. Ogólna teoria systemów. Tendencje rozwojowe. Pr. zb., Red. G.J. Klir, WNT, Warszawa 1976, s. 48-81.

- [119] Rogov Je.I.: Realizacija matematičeskoj modeli deteterminatora. Kibernetika v gornom diele, Nauka, Ałma-Ata 1967.
- [120] Rogov Je.I.: K teorii nadežnosti vientilacionnyh sietiej. Tr.IDG AN Kaz. SSR, "Vientilacija i pylepodavlenije na rudnikach Kazachstana", t. 48, Ałma-Ata 1971, s. 70-73.
- [121] Rogov Je.I., Bankin S.S.: Metod ocenki nadežnosti šachtnyh vientilacionnyh sietiej. Tr. IDG AN Kaz. SSR "Vientilacija i gazopylepodavlenije na rudnikach Kazachstana", t. 49, Ałma-Ata 1971, s.14-17.
- [122] Rogov Je.I. i inni: Nadežnost provietrivanija ugotnyh šacht. Ałma-Ata, Nauka 1975.
- [123] Sciorta R.: Risoluzione numerica delle reti di ventilazione mineraria. Rivista Mineraria Siciliana, luglio-ottobre 1958, s. 52-53.
- [124] Scott D.R., Hinsley F.B.: Ventilation network, theory. Colliery Engng. 1951, nr 324, 326, 328, 334.
- [125] Sierpiński W.: Wstęp do teorii mnogości i topologii. PZWS, Warszawa 1965.
- [126] Simode E.: Determination de la nature (stable ou instable) des branches d'un réseau. Ind. Miner., s. Mine, Doc. SIM nr 3 "Aérage", Chept. XII, Avril 1976, s. 191-209.
- [127] Siuda J.P. i inni: Wybor awaryjnych sostojanij električeskoj sietii pri issledovanii nadežnosti. Izv. WUZ Energetika, nr 4, 1976, s. 122-126.
- [128] Slepých W.F. i inni: O ocenke složnosti schiem provietrivanija. Vopr. Kompleksn. soviershenstvovanija gornych rabot. Apatity 1971.
- [129] Soule J.L.: Application de la theorie des réseaux maillés aux problèmes d'aérage miner. Annales des Mines, VI, 1960, s. 339-356.
- [130] Sovietov B.Je.: Osnovy postrojenija ASU. Izd. Lenigr. Univers., Leningrad 1975.
- [131] Staroń T.: Szerokość filarów ogniowych w zależności od własności fizyczno-mechanicznych węgla i parametrów wentylacyjno-depresyjnych. Przegląd Górniczy, nr 10, 1975.
- [132] Steenbrink P.A.: Optymalizacja sieci transportowych. WKŁ, Warszawa 1978.
- [133] Steiglitz K.: Wstęp do systemów dyskretnych. WNT, Warszawa 1977.
- [134] Sułkowski J.: Drzewo maksymalne prądów wentylacyjnych i jego pewne zastosowanie. ZN Pol. Śl. s. Górnictwo z. 41, Gliwice 1969, s. 525-534.
- [135] Sułkowski J.: Topologiczne kryterium odwikłania schematów kanonicznych sieci wentylacyjnych. Przegl. Górn. nr 2, 1970, s. 79-83.
- [136] Sułkowski J.: Miara złożoności struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej. Ref. Symp. Sekcji Fiz. Górn. KG PAN, Kraków 1970.
- [137] Sułkowski J.: Rozwiązalność podstawowych zagadnień teorii kopalnianej sieci wentylacyjnej w zależności od jej struktury. Dys. dokt. Pol. Śl., Gliwice 1971.
- [138] Sułkowski J.: Mesure de la complexité de structure du réseau d'aérage minier. Arch. Górn. t. XVIII, z. 1, 1973, s. 11-18.
- [139] Sułkowski J.: Evaluation numériques de la structure du réseau d'aérage minier basants sur la densité du graphe. Arch. Górn. t. 23, z. 2, 1978, s. 129-143.
- [140] Sułkowski J.: Mesure de la compacité de structure du réseau d'aérage minier. Arch. Górn., t. 23, z. 2, 1978, s. 103-113.
- [141] Sułkowski J.: Rozmieszczenie czujników wydatku przepływu powietrza w kopalnianym systemie wentylacyjnym. Mech. i Autom. Górn., nr 8/129 1979, s. 25-29.

- [142] Szamkołowicz L.: Teoria grafów skończonych. Ossolineum 1971.
- [143] Sztarski M.: Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych. WKŁ, Warszawa 1972.
- [144] Takajšvili M.K., Chasilev V.Je.: Ob osnovach metodiki rasčeta nadežnosti i rieziervirovanija tieplovyh sietiej. Tieploenergietika, nr 4, 1972, s. 14-19.
- [145] Takeda E.: Connectivity in Fuzzy Graphs. Technol. Repts. Osaka Univ, t. 23, 1973, s. 343-352. Tłum. ros. Voprosy analiza i procedury prinialija riešenij. Sbornik pierievodov, Mir, Moskwa 1976.
- [146] Trutwin W.: Modelowanie stanów niestabilnych w sieciach wentylacyjnych za pomocą urządzeń analogowych. ZN AGH, s. Górnictwo, z. 19, Kraków 1968.
- [147] Trutwin W.: O propozycji pewnej miary zagrożenia robotników w kopalnianej sieci wentylacyjnej dymami pożarowymi. Arch. Górn., t. XIII, z. 2, 1968, s. 167-173.
- [148] Trutwin W.: On a certain measure of fire hazard disclosed in the mine ventilation network. Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. sci. techn., t. XVI, nr 2, 1968.
- [149] Tutte W.T.: How to draw a graph. Proc. London Math. Soc., ser. 3, vol 13, 1963, s. 743-768.
- [150] Ušskov K.Z.: Ob ocenke nadežnosti vientilacii šacht. Ugol, nr 7, 1971, s. 54-56.
- [151] Varžapetjan A.G., Korčunov G.: Identifikacija koefficientov značimosti elementov struktury kombinacionnyh avtomatov. AVT, nr 1, 1975, s. 25-30.
- [152] Vasserman A.D.: Metod raščeta nadežnosti vientilacionnyh sistem rudnikov. "Provetr. rudnikov severa", Nauka, Leningrad 1972.
- [153] Vasserman A.D. i inni: Metody ocenki vientilacionnyh sistem rudnikov. AN SSSR, Kolskij filiał, Nauka, Leningrad 1974.
- [154] Vienikov V.A. i inni: Niekotoryje voprosy nadežnosti elektroenergietičeskich sistem. Električestvo, nr 5, 1975.
- [155] Vietuchnowskij F.Je.: Grafy i sietii. Zborn. "Diskretnaja matematika i matematičeskoje voprosy kibernetiki. T. 1, Nauka, Moskwa 1974, s. 149-206.
- [156] Voźniatij G.E., Kuricyn I.W.: Ocenka složnosti sistem. Resp. miežved. sborn. "Avtom. vyčisl. techn.", vyp. 5, Vyš. Škoła, Mińsk 1975.
- [157] Walkiewicz W.: Zwalczanie zagrożenia metanowego metodą kształtowania pól potencjalnych w sieciach wentylacyjnych kopalń. Prace GIG, Komunikat nr 671, Katowice 1976.
- [158] Wojciachowski K.: Model sytuacji metancwej w rejonie ściany wydobywczej. Cz. I i cz. II. Arch. Górn., t. 23, z. 4, 1978.
- [159] Zabrodzki J., Budkowski S.: Metody wyznaczania obszarów sprawności. Rozprawy Elektrotechn. z. 1, 1974, s. 15-40.
- [160] Zadeh L.A.: Fuzzy sets. Information and Control., vol. 8, nr 3 1965, s. 338-353.
- [161] Zadeh L.A.: Similarity relations and fuzzy orderings. Inform. Sciences., vol. 3, nr 2, 1971.
- [162] Zamojski W.: Modele niezawodnościowo-funkcjonalna systemów cyfrowych ze szczególnym uwzględnieniem systemów jednoprosocowych. Prace Naukowe ICT Pol. Wr. s. Monografie nr 10, Wrocław 1980.
- [163] Ziemia S.: Znaczenia badań urządzeń technicznych. ZN WSI, s. Mechanika-Eksploatacja, nr 6, Bydgoszcz 1973.
- [164] Ziemia S i inni: Problemy teorii systemów. Wszecznica PAN, Ossolineum 1980.

- [165] Zykov A.A.: Teorija konečnych grafov. Nauka, Novosibirsk 1969.
- [166] Zykov A.A.: Gipergrafy. Uspechi Matem. Nauk, t. 29, nr 6(180) 1974, s. 89-154.
- [167] Żytka W.: Optymalizacja sieci wentylacyjnej kopalni. Dys.dokt. Pol. Śl., Gliwice 1974.

METODY ODWZOROWANIA I MIARY STRUKTUR
KOPALNIANYCH SIECI WENTYLACYJNYCH

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem rozprawy jest struktura kopalnianej sieci wentylacyjnej odwzorowywana w postaci modeli-schematów wentylacyjnych. Opierając się na założeniu, że zbiór wyrobisk górniczych jest zbiorem rozmytym, opracowano metody odwzorowania struktury topologicznej oraz struktury przepływowej tworzonej przez te prądy wentylacyjne. Wykazano, że struktura przepływowa nie musi być odwzorowana tylko w postaci sieci dwubiegunowej; można przekształcić ją w - równoważne przeplywowo - sieci wielobiegunowe, albowiem pomiędzy wszystkimi węzłami sieci wentylacyjnej istnieje przepływ maksymalny. Przeanalizowano także odwzorowanie sieci wentylacyjnej na płaszczyźnie, odmiennie formułując znane kryterium Kuratowskiego. Wykazano, że z kolei strukturę funkcjonalną systemu wentylacyjnego wyrażać może funkcja przetwarzająca zmiany oporów bocznic uszkodzalnych na zmiany wydatków prądów powietrza w bocznicach stanowiących jego odbiory, a modelem systemu może być system logiczny kombinacyjny. Identyfikacja struktury funkcjonalnej systemu wentylacyjnego sprowadzona została do uściślenia postaci pewnego grafu zorientowanego, którego wierzchołkami są elementy wejść i wyjść systemu. Dla wyznaczania struktury niezawodnościowej systemu wentylacyjnego wykorzystać można z kolei strukturę funkcjonalną.

W rozprawie opracowano również liczbowe miary struktury sieci wentylacyjnej dla oceny ilościowej i porównywania sieci. Wykorzystano w tym celu współczynniki Korol'skiego-Potiemkina podobieństwa topologicznego uogólniając je na sieci wentylacyjne rozmyte oraz skonstruowano nowe miary liczbowe wyrażające złożoność i zwartość struktury sieci wentylacyjnych.

W końcowym rozdziale rozprawy omówiono możliwość wykorzystania schematów wentylacyjnych rozmytych do analizy sytuacji pożarowych, podano sposób projektowania rozmieszczenia czujników wydatku przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej, porównano niektóre oddziały eksploatacyjne pod względem możliwości ewakuowania się górników z zagrożonej ściany oraz dokonano oceny efektywności funkcjonowania systemu wentylacyjnego na przykładzie małej sieci wentylacyjnej i założonych współczynników niezawodności bocznic.

МЕТОДЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ И МЕРЫ СТРУКТУР
ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Резюме

Предметом рассуждения является структура шахтной вентиляционной сети изображаемая в виде вентиляционных схем. Предлагаем, что множество горных выработок является расплывчатым множеством. На этой основе разработано методы изображения топологической структуры, а также потоковой структуры созданной соединением вентиляционных струй. Было обнаружено, что необязательно потоковая структура должна быть изображаемая только образом двухполюсной сети; можно её преобразовать в эквивалентные по потоку сети многополюсные, так как между всеми узлами вентиляционной сети существует максимальный поток.

Переанализировано тоже изображение вентиляционной сети на плоскости, по другому формируя известный критерий Куратовского. Обнаружено, что функциональную структуру вентиляционной системы изображать может функция преобразования перемены аэродинамического сопротивления отказавших ветвей в перемены расхода воздуха в ветвях-потребителях воздуха, а образцом системы можно считать логическую комбинационную систему. отождествление функциональной системы приводит к уточнению образа ориентированного графа, вершинами которого являются элементы входа и выхода системы. В определении надёжной структуры можно использовать функциональную структуру.

В рассуждении разработано тоже числовые меры структуры вентиляционной сети. С этой целью использовано коэффициенты Корольского-Потемкина топологического подобия обобщая их на вентиляционные расплывчатые сети, а также конструировано новые числовые меры оценивающие сложность и спаянность структуры вентиляционной сети.

В окончательной главе рассуждения разобрано возможность использования вентиляционных расплывчатых схем для анализа пожарных состояний, сообщено метод проектирования размещения датчиков расхода воздуха в вентиляционной сети, сравнено некоторые эксплуатационные участки по возможности эвакуации людей из угрожающей лавы и оценено эффективность функционирования вентиляционной системы на основе небольшой вентиляционной сети принятых показателей надёжности ветвей.

METHODS FOR THE REPRESENTATION AND MEASURES OF THE STRUCTURES
OF MINE VENTILATION NETWORKS

Summary

The subject of the dissertation is the structure of the mine ventilation network designed in the form of models - ventilation scheme.

Based on the assumption, that a set of mine workings is a fuzzy set, one has elaborated the methods for the image of the topological structure as also the flows structure formed by underground air flows. It is shown, that the flows structure not have to be imaged just in the form of a bipole network, but may be converted into equivalent - in respect with the flow value - multiple networks, because between all the nodes the flow is maximum. Based on the analysis of the ventilation network plane image the known Kuratowski's criterion is formulated distinctly.

Then one argues that the functional structure of the ventilation system could be given by the function converting the resistances changes of the damaged branches into airflow quantities changes in branches which make the airflow receivers, and the model of the system may be done by a conditional logical system.

The identification of the functional structure of the ventilation system was reduced to the precision of the form of a certain oriented graph where vertex are the elements of the system inputs and outputs. For determine the reliability structure of the ventilation system one could use in turn the functional structure.

In the dissertation the numerical measures of the ventilation network are elaborated for the quantitative evaluation as for networks comparison. For this purpose are used the Korolski-Potiemkin's topological similarity factors and generalized for ventilation fuzzy networks, there are also new numerical measures constructed for the complexity and compactness of the ventilation networks.

In the final chapter of the dissertation are given:

- the possibility for the use of ventilation fuzzy scheme to the analysis of the fire situation,
- the method for designing the location of sensors for airflow quantities measurements in ventilation network,
- the comparison of some mining sections in concern with the evacuation of the miners from the hazarded face,

- as also the estimation of the effectiveness of the ventilation system work basing on the example of a small ventilation network with assumed reliability factors of the branches.



P 3351 | 82 | 115

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- 44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —
Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.