ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P.3351/93

MARIAN KOLARCZYK

WPŁYW STRUKTURY KOPALNIANEJ SIECI WENTYLACYJNEJ NA WRAŻLIWOŚCI PRĄDÓW POWIETRZA PRZY ZMIANACH OPORÓW BOCZNIC

GÓRNICTWO

z. 214
Gliwice
1993

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1206

P.3351/93

MARIAN KOLARCZYK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA Biblioteka Główna Gliwice

WPŁYW STRUKTURY KOPALNIANEJ SIECI WENTYLACYJNEJ NA WRAŻLIWOŚCI PRĄDÓW POWIETRZA PRZY ZMIANACH OPORÓW BOCZNIC

Gliwice 1993

OPINIODAWCA

Prof. zw. dr hab. inż. Jan Pawiński
Prof. dr hab. inż. Andrzej Strumiński

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU – Prof. dr hab. inż. Walery Szuścik
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta Leśko

REDAKCJA
Mgr Kazimiera Rymarz

REDAKCJA TECHNICZNA
Alicja Nowacka

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372 - 9508

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakład 150+83 Ark.wyd. 13 Ark.druk.12.5 Papier offset III x 80g
Oddano do druku 21.05.1993 r. Druk ukończono w czerwcu 1993 r.
Podpisano do druku 21.05.1993 r. Cena 18.200,-

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w SC "AMGraf", Gliwice, ul. Jasna 8

SPIS TREŚCI

str.

1. WPROWADZENIE 15

1.1. Wstęp 15
1.2. Przedmiot, teza, cel i zakres pracy 17
1.3. Przyjęte w pracy założenia upraszczające opis matematyczny przepływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej 19

2. METODY ROZPOZNAWANIA WŁAŚCIWOŚCI BOCZNIC I STRUKTUR KOPALNIANYCH SIECI WENTYLACYJNYCH 21

2.1. Podjęty w pracy zakres badań struktury sieci 21
2.2. Wyznaczanie warstw węzłów w sieci 24
2.3. Przekrój całkowity przez sieć poprowadzony przez bocznice - odbiory powietrza 28
2.4. Dostępność i osiągalność w zbiorze węzłów sieci 31
2.5. Redukcja połączeń szeregowo-równoległych 35
2.6. Istnienie i wydzielanie podsieci. Sieć zredukowana 36
2.6.1. Charakterystyka metody wydzielania i redukcji podsieci 40
2.7. Metoda badania planarności kopalnianej sieci wentylacyjnej ... 45
2.7.1. Uwagi o dotychczasowych badaniach planarności sieci ... 45
2.7.2. Wybrane właściwości strukturalne elementów acyklicznej sieci płaskiej zredukowanej 48
2.7.3. Charakterystyka metody wyznaczania cykli-komórek i badania planarności sieci z wykorzystaniem osiągalności zwyczajnej 52
2.7.4. Charakterystyka metody wyznaczania cykli-komórek i badania planarności sieci z wykorzystaniem osiągalności specjalnej 59
2.7.5. Uwagi o możliwości traktowania schematu kanonicznego jako obiekt w przestrzeni trójwymiarowej 63

2.7.6. Możliwość uogólnienia proponowanej metody badania planarności na dowolne grafy..... 65

2.8. Badania charakteru bocznic w sieci..... 66

2.8.1. Sposoby definiowania bocznic normalnych i przekątnych. 66

2.8.2. Wyznaczanie bocznic normalnych i przekątnych z wszystkich łańcuchów przez sieć..... 70

2.8.3. Bocznice normalne i przekątne w acyklicznych zredukowanych sieciach płaskich..... 75

2.8.4. Przekątność bocznic w sieciach niepłaskich..... 80

2.8.5. Klasyfikacja bocznic przekątnych ze względu na ich położenie w strukturze sieci..... 84

2.9. Pary bocznic w sieci..... 89

2.9.1. Wzajemny charakter dwu bocznic w sieci..... 89

2.9.2. Bocznice quasi-równoległe i quasi-szeregowe w acyklicznej sieci zredukowanej..... 93

2.10. Opracowany ciąg programów analizy struktury sieci..... 99

3. WRAŻLIWOŚCI WYDATKÓW POWIETRZA NA ZMIANY OPORÓW BOCZNIC W KOPALNIANYCH SIECIACH WENTYLACYJNYCH O RÓŻNYCH STRUKTURACH..... 101

3.1. Matematyczna i fizyczna interpretacja wrażliwości wydatków powietrza na zmianę oporu bocznicy..... 101

3.2. Metody wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic..... 105

3.3. Interpretacja sieciowa metody wyznaczania dowolnej kolumny macierzy wrażliwości..... 110

3.4. Niektóre właściwości pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic..... 111

3.5. Analiza wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w sieciach normalnych..... 115

3.6. Znaczenie nachylenia charakterystyk wentylatorów rzeczywistych i zastępczych w przedstawionych metodach wyznaczania wrażliwości..... 118

3.7. Analiza wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w sieci przekątnej prostej..... 122

3.8. Uwagi o istnieniu niemonotonicznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$..... 132

3.9. Wyznaczanie wrażliwości drugiego rzędu $\varepsilon_{ir}^{(2)}$..... 139

3.10. Jednoznaczność znaków wrażliwości w cyklach-komórkach sieci płaskich..... 144
3.11. Przykłady niejednoznaczności znaków wrażliwości w sieciach niepłaskich..... 150
3.12. Warunki jednoznaczności znaków wrażliwości dla par bocznic.. 159
3.12.1. Analiza znaków wrażliwości dla par bocznic nie leżących w drodze..... 159
3.12.2. Analiza znaków wrażliwości dla par bocznic leżących w drodze..... 163
3.13. Klasyfikacja par bocznic ze względu na jednoznaczność znaków wrażliwości..... 166
3.14. Przykłady wyników pomiarów zależności wydatków powietrza od oporów bocznic..... 173

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE..... 180
4.1. Wnioski..... 180
4.2. Uwagi końcowe..... 184

LITERATURA..... 186

STRESZCZENIA..... 194

CONTENS

Page

1. PREFACE..... 15

1.1. Introduction..... 15
1.2. Subject matter, proposition, aim and range of the publication. 17
1.3. Assumptions accepted to simplify the mathematical description of the air flow through the mine ventilation network..... 19

2. METHODS OF DETERMINING THE PROPERTIES OF BRANCHES AND STRUCTURES OF VENTILATION NETWORKS IN MINES..... 21

2.1. Range of investigations concerning the structure of networks.. 21
2.2. Determination of the layers of nodes in a network..... 24
2.3. Full section across the network, intersecting the branches, the consumers of air..... 28
2.4. Accessibility and attainability in the set of nodes of the network..... 31
2.5. Reduction of series-parallel connections..... 35
2.6. Existence and separation of sub-networks. Reduced network..... 36
2.6.1. Characteristics of the method of separation and reduction of sub-networks..... 40
2.7. Method of investigating the planarity of the mine ventilation network..... 45
2.7.1. Remarks concerning investigations of planary networks up to now..... 45
2.7.2. Some selected structural properties of the elements of an acyclic reduced flat network..... 48
2.7.3. Characteristics of the method of determining the cell-cycles and investigations of the planarity of networks making use of simple attainability..... 52
2.7.4. Characteristics of the method of determining the cell-cycles and investigations of the planarity of networks making use of special attainability..... 59
2.7.5. Remarks concerning the possibility of treating a canonic diagram as an object in three-dimenasional space... 63

2.7.6. Possibilities of generalizing the suggested method of investigating the planarity in the form of graphs..... 65

2.8. Investigations concerning the character of network branches... 66

2.8.1. Ways of defining normal and diagonal branches..... 66

2.8.2. Determination of normal and diagonal branches from all the chains in the network..... 70

2.8.3. Normal and diagonal branches in acyclic reduced flat networks..... 75

2.8.4. Diagonality of branches in not flat-networks..... 80

2.8.5. Classification of diagonal branches..... 84

2.9. Pairs of branches in the network..... 89

2.9.1. Mutual character of two branches in the network..... 89

2.9.2. Quasi-parallel branches, quasi-serial branches in an acyclic reduced network..... 93

2.10. Sequence of programmes for the analysis of the network structure..... 99

3. SENSITIVITY OF THE VOLUME FLOW OF AIR TO CHANGES OF THE RESISTANCE OF BRANCHES IN VARIOUS STRUCTURES OF MINE VENTILATION NETWORKS..... 101

3.1. Mathematical and physical interpretation of the sensivity volume flow of air to changes of the resistance of a branch..... 101

3.2. Method of determining the sensitivity of the volume flow of air to changes of the resistance of branches..... 105

3.3. Net interpretation of the method of determining any column of the matrix of sensitivity..... 110

3.4. Some properties of a full matrix of the sensitivity of the volume flow of air to changes of the resistance of branches..... 111

3.5. Sensitivities of the volume flow of air to changes of the resistance of branches in normal networks..... 115

3.6. The meaning of the gradient of the characteristics of real and supplementary fans in the presented methods of determining the sensitivity..... 118

3.7. Analysis of the sensitivity of the volume flow of air to changes of the resistance of branches in a straight diagonal network..... 122

3.8. Remarks concerning the existence of non-monotonic relations $\dot{V}_i(R_r)$..... 132

3.9. Determination of the sensitivity of the second order $\varepsilon_{ir}^{(2)}$..... 139

3.10. Univocal character of the signs of sensitivity in cell-cycles of flat networks..... 144
3.11. Examples of the non-univocal character of the signs of sensitivity in not flat networks..... 150
3.12. Conditions of the univocal character of the signs of sensitivity for pairs of branches..... 159
3.12.1. Analysis of the signs of sensitivity for pairs of branches not situated along the path..... 159
3.12.1. Analysis of the signs of sensitivity for pairs of branches situated along the path..... 163
3.13. Classification of pairs of branches with respect to the univocal character of the signs of sensitivity..... 166
3.14. Examples of measuring results of the relation between the vovolume flow of air and the resistance of the branches..... 173

4. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS..... 180
4.1. Conclusions..... 180
4.2. Final remarks..... 184

REFERENCES..... 186

SUMMARY..... 194

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

1. ВВЕДЕНИЕ..... 15

1.1. Вводные замечания..... 15
1.2. Предмет, тезис, цель и объём работы..... 17
1.3. Принятые в работе предпосылки упрощающие математическое описание протекания воздуха в шахтной вентиляционной сети..... 19

2. МЕТОДЫ ПРОЯВЛЕНИЯ СВОЙСТВ ВЕТВЕЙ И СТРУКТУР ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ..... 21

2.1. Содержащийся в работе объём исследований структуры сети..... 21
2.2. Определение слоев узлов в сети..... 24
2.3. Полный разрез по сети проведенный по приёмным ветвям-потребителям воздуха..... 28
2.4. Доступность и достижимость в совокупности узлов сети..... 31
2.5. Редукция параллельно-последовательных соединений.. 35
2.6. Существование и выделение подсетей. Редуцированная сеть..... 36
2.6.1. Характеристика метода выделения и редукции подсети..... 40
2.7. Метод исследования планарности шахтной вентиляционной сети..... 45
2.7.1. Замечания о проводимых до сих пор исследованиях планарности сети..... 45
2.7.2. Выбранные структурные свойства элементов ациклической плоской редуцированной сети... 48
2.7.3. Характеристика метода определения цикловячеек и исследования планарности с использованием обычной достижимости..... 52
2.7.4. Характеристика метода определения цикловячеек и исследования планарности с использованием специальной достижимости..... 59

2.7.5. Замечания о возможностях подхода к канонической схеме, как к объекту в трёхмерном пространстве..... 63
2.7.6. Возможность обобщить представленый метод исследования планарности на произвольные графы..... 65
2.8. Исследования характера ветвьей в сети..... 66
2.8.1. Способы определения устойчивых и диагональных ветвей..... 66
2.8.2. Определение устойчивых и диагональных ветвей из всех цепей в сети..... 70
2.8.3. Устойчивые и диагональные ветви в ациклических плоских сетях..... 75
2.8.4. Диагональность ветвей в неплоских сетях.... 80
2.8.5. Классификация диагональных ветвей..... 84
2.9. Пары ветвей в сети..... 89
2.9.1. Взаимный характер двух ветвей в сети..... 89
2.9.2. Ветви квазипараллельные, квазипоследовательные в ациклической редуцированной сети. 93
2.10. Разработанная последовательность программ анализа структуры сети..... 99

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАСХОДОВ ВОЗДУХА К ИЗМЕНЕНИЯМ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ В РАЗНЫХ СТРУКТУРАХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ..... 101

3.1. Математическое и Физическое представление чувствительности расхода воздуха к изменению сопротивления ветви..... 101
3.2. Методы определения чувствительности расходов воздуха к изменениям сопротивлений ветвей..... 105
3.3. Сетевое представление метода определения любого столбца матрицы чувствительности..... 110
3.4. Некоторые свойства полной матрицы чувствительности к изменениям сопротивлений ветвей..... 111
3.5. Чувствительности расходов воздуха к изменениям сопротивлений ветвей в параллельно-последовательных сетях..... 115

3.6. Значение наклона характеристик реальных и заменяющих вентиляторов в представленных методах определения чувствительности..... 118
3.7. Анализ чувствительности расходов воздуха к изменениям сопротивлений ветвей в простой диагональной сети..... 122
3.8. Замечания о существовании немонотонной зависимости $\dot{V}_i(R_r)$..... 132
3.9. Опредление чувствительности второво порядка $\varepsilon^{(2)}_{ir}$.. 139
3.10. Однозначность знаков чувствительности в циклах-ячейках плоских сетей..... 144
3.11. Примеры неоднозначности знаков чувствительности в неплоских сетях..... 150
3.12. Критерии однозначности знаков чувствительности для пар ветвей 159
3.12.1. Анализ знаков чувствительности для пар ветвей не находящихся на пути..... 159
3.12.2. Анализ знаков чувствительности для пар ветвей находящихся на пути..... 163
3.13. Классификация пар ветвей по однозначности знаков чувствительности..... 166
3.14. Примеры результатов измерений зависимостей расходов воздуха от сопротивлений ветвей..... 173

4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ..... 180
4.1. Выводы..... 180
4.2. Заключительные замечания..... 184

ЛИТЕРАТУРА..... 186

РЕЗЮМЕ..... 194

OZNACZENIA

W - zbiór węzłów sieci

n - liczba węzłów w sieci

W_k - zbiór węzłów w k-tej warstwie

w_p, w_k - węzły początkowy i końcowy bocznicy

w_{pb}, w_{kb} - węzły początkowy i końcowy bocznicy badanej

w_{pr}, w_{kr} - węzły początkowy i końcowy bocznicy zmieniającej opór

w_{ps}, w_{ks} - węzły początkowy i końcowy sieci

w_{pp}, w_{kp} - węzły początkowy i końcowy podsieci

w_{dk}, w_{gk} - węzły dolny i górny komórki

w_{zl} - węzeł zlepiający bocznice odbiory powietrza

$poz(w_i)$ - poziom węzła (numer warstwy do której został zaliczony węzeł)

$l_{pl}(w_i)$ - liczba bocznic przy węźle w_i z orientacją od węzła

$l_{mi}(w_i)$ - liczba bocznic przy węźle w_i z orientacją do węzła

b_b, b_r, b_z - bocznice: badana, zmieniająca opór, zamykająca

$skok(b_i)$ - różnica poziomów węzła końcowego i początkowego bocznicy b_i

$lb_i^{"+"}$, $lb_i^{"-"}$ - liczby występowania bocznicy b_i we wszystkich łańcuchach ze znakiem dodatnim, ujemnym

m - liczba bocznic w sieci

ν - liczba cyklomatyczna

$\mathcal{D}$ - zbiór dróg

$d = w_i \to w_j$ - droga od węzła w_i do węzła w_j

$\mathcal{L}$ - zbiór łańcuchów

$\ell = w_i \rightsquigarrow w_j$ - łańcuch od węzła w_i do węzła w_j

$\Gamma(w_i)$, $\Gamma^{-1}(w_i)$ - zbiór następników i poprzedników węzła w_i

$V_{w_i}^{+}$, - zbiór węzłów dostępnych z węzła w_i

$V_{w_i}^{-}$, - zbiór węzłów z których dostępny jest węzeł w_i

$\mathbb{D}$ - macierz dostępności w zbiorze węzłów

$\mathbb{L}$ - macierz osiągalności w zbiorze węzłów

$osg(w_i, w_j)$ - osiągalność (liczba dróg od węzła w_i do węzła w_j)

R - opór bocznicy

$\dot{V}$ - wydatek objętościowy powietrza

W - spadek naporu powietrza

H - spiętrzenie wentylatora

$\dot{V}_z$, W_z, H_z - wielkości zastępcze w charakterystykach części sieci odpowiednio: wydatek objętościowy powietrza, spadek naporu, przyrost naporu

A, A' - pełna i skrócona macierz przejść

P, P' - pełna i skrócona macierz połączeń

$\mathbb{S}$ - macierz incydencji węzłowo-bocznicowa

$\mathbb{C}$ - macierz incydencji cyklowo-bocznicowa

$\dot{\mathbb{V}}$ - jednokolumnowa macierz wydatków powietrza

$\mathbb{W}$ - jednokolumnowa macierz spadków naporu powietrza

s_{ji} - wyraz macierzy $\mathbb{S}$

c_{ki} - wyraz macierzy $\mathbb{C}$

ε_{ir} - wrażliwość wydatku powietrza w i-tej bocznicy na przyrost oporu w r-tej bocznicy

$\varepsilon^{(2)}_{ir}$ - wrażliwość drugiego rzędu wydatku powietrza w i-tej bocznicy na przyrost oporu w r-tej bocznicy

$\mathbb{E}$ - macierz wrażliwości

S^* - sieć dołączona

R^* - opór bocznicy w sieci dołączonej

H^* - źródło wymuszające przepływy w sieci dołączonej

A_{ir} - amplituda wydatku powietrza $\dot{V}_i$ (różnica wydatków powietrza $\dot{V}_i$ uzyskanych przy oporze $R_r = \infty$ i $R_r = 0$)

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Narastające zagrożenia w podziemnych zakładach górniczych zmuszają do stosowania coraz bardziej kosztownych sposobów wymuszania przepływu powietrza przez kopalnię oraz do kontroli wielu parametrów atmosfery w miejscach pracy załogi. Obserwuje się, że systemy wentylacyjne kopalń są coraz mniej tolerancyjne na powstające zakłócenia. Pracują z coraz mniejszym marginesem bezpieczeństwa, co przy rosnących zagrożeniach pociąga za sobą częste pojawianie się stanów awaryjnych. Rozpływ powietrza w kopalni jest dostosowywany do zmieniających się zagrożeń w oddziałach wydobywczych i przygotowawczych poprzez regulację pracy wentylatorów głównych oraz stosowanie wielu tam regulacyjnych i wentylacyjnych. Często zachodzi potrzeba dokonywania zmiany w rozpływie z powodu zamykania pól wyeksploatowanych i uruchamiania nowych oddziałów. Niekorzystne zmiany w rozpływie zachodzą także wskutek przypadkowego uszkadzania urządzeń wentylacyjnych, w sytuacjach pożarowych lub w czasie innych katastrof górniczych (zawały, tąpnięcia, wyrzuty, zalania wodą, itp.).

Polskie przepisy górnicze zabraniają stosowania pod ziemią wentylatorów pomocniczych, wspomagających pracę wentylatorów głównych. Taka sytuacja wynika z większej zawodności pracy tych urządzeń oraz z dodatkowych komplikacji w systemie wentylacyjnym, zwłaszcza w czasie pożarów, kiedy to na drodze przepływu dymów muszą być wyłączone wszystkie urządzenia energomechaniczne. Nowe rozwiązania techniczne z pewnością doprowadzą do wzrostu niezawodności pracy wentylatorów pomocniczych. Lepsza znajomość funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni wspomagana oczujnikowaniem sieci i komputerowym przetwarzaniem danych z kopalni, łącznie z wypracowywaniem sposobów postępowania w możliwych sytuacjach awaryjnych, z pewnością pozwoli na wykorzystanie zalet wynikających z pracy wentylatorów pomocniczych. Taką tendencję obserwuje się w kopalniach rudy miedzi w LGOM, gdzie obecnie pracuje już kilka egzemplarzy wentylatorów pomocniczych, a na szeroką skalę są stosowane małe i duże wentylatory swobodne.

Przede wszystkim jednak (zwłaszcza w kopalniach węgla) do odpowiedniego ukształtowania rozpływu powietrza stosowane są tamy regulacyjne i wenty-

lacyjne. Jest to więc regulacja wykorzystująca zmiany oporów niektórych elementów sieci. Wprowadzenie jednej lub kilku takich zmian ma doprowadzić do uzyskania nowego, zamierzonego rozpływu powietrza w kopalni lub w jej części. Istotnym zagadnieniem jest sposób wypracowywania nowej nastawy regulatorów, tzn. rozmieszczenia i oporów tam regulacyjnych. W praktyce odbywa się to często metodą prób z wykorzystaniem kilku pomiarowców obserwujących i oceniających efekty wprowadzanych zmian.

W kopalniach posiadających opracowane modele cyfrowe sieci takie próby można wykonywać na komputerze poprzez symulację rozpływu powietrza w sieci. Zezwala to na wybór odpowiedniego wariantu rozmieszczenia i nastawy regulatorów. W sposobie wykonywania wspomnianych obliczeń często stosuje się jednak metodę prób i błędów. Proponowane zmiany dotyczące rozmieszczenia i oporów tam regulacyjnych wprowadza się wykorzystując wiedzę, doświadczenie zawodowe i intuicję osoby odpowiedzialnej za kierowanie przewietrzaniem. W przypadku uzyskania w trakcie symulacji odpowiedzi negatywnej ponownie w ten sam sposób poszukuje się założeń do kolejnego wariantu obliczeń. Wydłuża to znacznie czas uzyskiwania poszukiwanego rozwiązania.

Taki sposób postępowania nie jest błędny. Wskazane jest jednak opracowanie nowych metod i algorytmów, w których nastawy regulatorów potrzebne do uzyskania wymaganego rozpływu powietrza wypracowywane będą przez odpowiedni program komputerowy. W tym zagadnieniu, a także w procesie sterowania rozpływem powietrza przydatna będzie informacja o wrażliwościach (czułościach) prądów powietrza na wprowadzane zmiany oporów. Prawidłowości występujące w sieci w zakresie wspomnianych wrażliwości będą więc przedmiotem badań w niniejszej pracy.

W trakcie analizy tego zagadnienia okazało się, że wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic między innymi są silnie uzależnione od struktury sieci. Nauka i praktyka górnicza znają wiele przykładów znaczącego wpływu cech struktury na rozwiązywane zagadnienia. Sieć wentylacyjna czynnej kopalni organizowana jest na bazie istniejących wyrobisk, które są drogami dla przepływającego powietrza. Wyrobiska te pełnią różne funkcje w procesie technologicznym. Często występuje kolizja pomiędzy wentylacyjną a innymi funkcjami wyrobiska, co może powodować powstawanie stanów awaryjnych.

Szkielet wyrobisk kopalni udostępnia i przygotowuje złoże do eksploatacji. Różnorodność zalegania złóż powoduje, że sposoby udostępnienia, przygotowania i systemy wybierania w poszczególnych kopalniach nie są jednakowe. Powstające sieci wentylacyjne tych kopalń, a zwłaszcza struktury

tych sieci, są bardzo zróżnicowane. Często struktura sieci posiada cechy niekorzystne, utrudniające prawidłowe przewietrzanie. Wynika to z kompromisu między zadaniami produkcyjnymi kopalni a usługową funkcją systemu przewietrzania.

Duża liczba kopalń w Polsce pełni swoje zadania produkcyjne przez wiele lat. W tym okresie dla zapewnienia ciągłości wydobycia kopalnia musi być ciągle rozbudowywana, co wiąże się z koniecznością budowy nowych zazwyczaj głębszych poziomów lub z udostępnianiem sąsiednich partii złoża. Powoduje to, że sieć wentylacyjna zaprojektowana nawet poprawnie dla początkowego okresu istnienia kopalni ulega ciągłym rekonstrukcjom. Często nakłady inwestycyjne na modernizację wentylacji nie są wystarczające, co przy rosnących zagrożeniach utrudnia zorganizowanie prawidłowego przewietrzania. Za celowe należy więc uważać wypracowanie dalszych sposobów oceny struktury sieci wentylacyjnej, w tym także opracowanie odpowiednich metod, algorytmów i programów komputerowych umożliwiających szybką analizę i ocenę struktury sieci oraz właściwości poszczególnych bocznic.

1.2. Przemiot, teza, cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest struktura kopalnianej sieci wentylacyjnej oraz wrażliwości wydatków prądów powietrza na zmiany oporów bocznic.

Zamierzony lub przypadkowy przyrost oporu bocznicy powoduje zmiany w rozpływie powietrza w sieci. Przy ocenie tych zmian mogą być także przydatne informacje o elementarnych przyrostach wydatków powietrza $d\dot{V}_l$, powstających przy elementarnych zmianach oporów dR_r, czyli wrażliwości wydatków powietrza $d\dot{V}_l/dR_r$ na zmiany oporów bocznic w aktualnym stanie pracy sieci. Przez wrażliwość ε_{lr} będziemy więc rozumieć wartość pochodnej $d\dot{V}_l/dR_r$ obliczoną w aktualnym stanie pracy sieci. Bardziej dokładne definicje wprowadzonych wielkości podane zostaną w rozdziale 3.

Jak już wspomniano, w trakcie badań stwierdzono istotny wpływ struktury sieci na wrażliwości. Uwaga ta dotyczy wartości wrażliwości ε_{lr}, a także znaków ε_{lr}. Dlatego też główną tezę pracy sformułowano w sposób następujący:

Wrażliwości wydatków prądów powietrza, a tym samym zmiany w rozpływie powstające przy celowych lub przypadkowych zmianach oporów bocznic uzależnione są od:

- początkowego (aktualnego) stanu pracy sieci,
- właściwości struktury sieci,

- charakteru i właściwości poszczególnych bocznic;

możliwe jest rozpoznanie i opis matematyczny prawidłowości występujących w tym zagadnieniu.

Pierwsza część tezy dotycząca znaczenia aktualnego stanu pracy sieci w zagadnieniach związanych z powstającymi zmianami w rozpływie powietrza wydaje się niepotrzebna. W wielu pracach wykazywano znaczenie aktualnego schematu ilościowego i potencjalnego sieci. Nadmienić jednak należy, że nie w pełni rozeznane są zmiany powstające w tych schematach przy zmianach parametrów bocznic w sieci.

Druga i trzecia część tezy dotyczy struktury sieci, właściwości poszczególnych bocznic oraz par bocznic w sieci, wpływających na przebieg zależności wydatków powietrza od oporów bocznic. W tym zakresie dobrze rozeznane są prawidłowosci występujące w sieciach normalnych. Przenoszenie tych prawidłowości na sieci o innych strukturach nie zawsze jest słuszne. Za celowe uznano więc rozpoznanie prawidłowości występujących w sieciach nie posiadających struktury szeregowo-równoległej. Mało jest prac analizujących poruszone zagadnienie.

Rozwój metod analizy obiektów technicznych z wykorzystaniem komputerów oraz przydatność tych metod w praktyce skłania do wypracowania odpowiednich algorytmów i programów komputerowych analizujących poruszane zagadnienia. W pracy przyjęto więc, że każda opracowana metoda analizy struktury sieci oraz wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic wyposażona będzie w odpowiedni program komputerowy. Objętość pracy zezwala jedynie na przedstawienie ogólnego opisu opracowanych metod.

Dla wykazania słuszności postawionej tezy sprecyzowano następujące cele cząstkowe pracy:

- opracowanie metod, algorytmów i programów komputerowych rozpoznawania właściwości struktury sieci oraz właściwości poszczególnych bocznic,
- opracowanie metod wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic,
- przebadanie prawidłowości odnośnie do wrażliwości wydatków powietrza w powiązaniu z właściwościami struktury sieci oraz właściwościami poszczególnych bocznic,
- przeprowadzenie analizy i klasyfikacji charakteru zależności wydatków powietrza od zmian oporów bocznic w powiązaniu ze strukturą sieci.

Opracowane metody analizy struktury sieci oraz ogólny opis zastosowanych algorytmów podano w rozdziale drugim. Zwrócono uwagę na istnienie klas sieci posiadających określone właściwości strukturalne istotne przy

rozwiązywaniu różnych zagadnień sieciowych, w tym także przy wyznaczaniu wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic.

Rozdział trzeci pracy poświęcony jest metodom wyznaczania wrażliwości, analizie prawidłowości występujących w sieciach normalnych, przekątnych płaskich, przekątnych niepłaskich. Podana zostanie także klasyfikacja par bocznic uwzględniająca znak wrażliwości ε_{ir} wynikający ze struktury oraz z aktualnego rozpływu powietrza w sieci.

W rozdziale czwartym podano najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz dalsze interesujące kierunki prowadzenia prac badawczych. Przyjęty w pracy zakres badań, obejmujący badania właściwości sieci wynikające z jej struktury, badania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w powiązaniu z cechami struktury sieci, nie wyczerpuje poruszanej problematyki. Przedstawione metody oraz wyniki pracy mogą być wykorzystane do prowadzenia dalszych prac badawczych.

Badania struktury sieci oraz jej właściwości wpływających na prawidłowości dotyczące wrażliwości wydatków przeprowadzono przy dość istotnych założeniach upraszczających opis matematyczny przepływu powietrza w sieci. Założenia te przedstawiono w następnym punkcie pracy.

1.3. Przyjęte w pracy założenia upraszczające opis matematyczny przepływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej

Złożoność procesów zachodzących w kopalni głębinowej znacznie utrudnia zbudowanie uniwersalnego modelu matematycznego sieci wentylacyjnej, opisującego i wyjaśniającego wszystkie występujące zjawiska. Chcąc wykazać znaczenie właściwości struktury sieci w zagadnieniu wrażliwości prądów powietrza, a tym samym powstawania zmian w rozpływie, spowodowanych zamierzonymi lub przypadkowymi zmianami oporów, na obecnym etapie badań systemów wentylacyjnych za celowe uznano przyjęcie następujących założeń upraszczających, dotyczących opisu przepływu powietrza w wyrobisku i w sieci:

- przepływ powietrza w poszczególnych bocznicach traktuje się jako jednowymiarowy wzdłuż linii prądu,
- gęstość powietrza przyjmuje się stałą,
- spadek naporu powietrza spowodowany oporami ruchu przyjmuje się jako proporcjonalny do kwadratu wydatku powietrza,
- dodatkowe naturalne źródła ruchu przyjmuje się w postaci depresji lokalnych,

- nie uwzględnia się stanów przejściowych zachodzących po wprowadzeniu zmiany w sieci; obserwowane zależności traktowane są jako ciąg stanów ustalonych,
- wentylatory pracują na opadającej części charakterystyki zgodnie z tzw. wymogami pracy stabilnej.

W trakcie prowadzenia jakichkolwiek obliczeń sieci wentylacyjnej dysponować trzeba danymi wejściowymi. Zagadnienie pozyskiwania tych danych nie jest jeszcze w pełni rozwiązane, co wiąże się także ze stopniem szczegółowości opisu przepływu powietrza w wyrobisku i w sieci. Zagadnienie to nie będzie analizowane w niniejszej pracy. Zakładać natomiast będziemy, że wielkości te są znane i opracowane zgodnie z przyjętymi wyżej założeniami upraszczającymi, a mianowicie:

- struktura sieci odwzorowana jest w sposób graficzny na schemacie przestrzennym lub w sposób cyfrowy przez podanie dowolnej macierzy ujmującej relacje zachodzące między węzłami i bocznicami,
- znane są charakterystyki wszystkich bocznic ujmujące zależności między spadkiem naporu, przyrostem ciśnienia a wydatkiem powietrza (tzn. znana jest postać charakterystyki bocznicy i figurujące w niej parametry),
- znany jest aktualny stan pracy sieci, tzn. aktualne wydatki, spadki naporu i spiętrzenia wentylatorów we wszystkich bocznicach.

Wymienione wielkości osiągalne są oczywiście tylko w kopalniach, w których na bieżąco wykonywane są pomiary dołowe zmierzające do aktualizacji danych o parametrach bocznic i o strukturze sieci. Obecnie duża dostępność sprzętu komputerowego spowodowała wyraźne zainteresowanie kopalnianych służb wentylacyjnych możliwościami symulacji przypływów powietrza na komputerach. Uważać należy, że w takiej sytuacji stan rozpoznania sieci jest dużo lepszy niż w poprzednich okresach, co niewątpliwie wpływa na poprawę bezpieczeństwa funkcjonowania sieci. Ta nowa jakościowo sytuacja sprzyja także prowadzeniu dalszych badań dotyczących pracy systemów wentylacyjnych kopalń, wdrażaniu nowych sposobów kontroli i analizy sieci.

2. METODY ROZPOZNAWANIA WŁAŚCIWOŚCI BOCZNIC I STRUKTUR KOPALNIANYCH SIECI WENTYLACYJNYCH

2.1. Podjęty w pracy zakres badań struktury sieci

Jak już wspomniano, sieć wentylacyjna czynnej kopalni wykorzystuje istniejące wyrobiska jako drogi przepływu powietrza. Nie jest i nie może być oderwana od procesu technologicznego kopalni, a wręcz pełni w tym procesie rolę usługową. Przy projektowaniu kopalni lub jej fragmentów uwzględnia się oczywiście konieczność zorganizowania przewietrzania, lecz muszą być także uwzględnione pozostałe elementy technologii wybierania. Stąd też w sieciach wentylacyjnych pojawiają się elementy sprzyjające powstawaniu właściwości niekorzystnych. Struktura sieci daleka jest od układu połączeń szeregowo-równoległych, uważanego za rozwiązanie wzorcowe występujące w przyrodzie w systemach krwionośnych żywych organizmów. Wielkość sieci, praca kilku wentylatorów, duża liczba prądów przekątnych i tzw. prądów zależnych, duża liczba wyrobisk, w których wymagane jest dławienie prądów powietrza dla ograniczania strat powodują, że tzw. niezależność prądów rejonowych oraz ich trwałość jest tylko pozorna. Nauka o wentylacji kopalń poprzez prowadzenie działalności badawczej oraz praktyka górnicza pracują nad doskonaleniem funkcjonowania systemów przewietrzania. Powstające awarie oraz katastrofy świadczą jednak o zawodności stosowanych rozwiązań.

Struktura sieci wentylacyjnej w dokumentacjach prowadzonych w zakładach górniczych i w urzędach odwzorowywana jest na mapach i schemacie przestrzennym. Okresowo sporządzany jest uproszczony schemat potencjalny. W latach siedemdziesiątych zaniechano sporządzania schematów kanonicznych całych sieci. Decyzję tę uzasadniano dużą pracochłonnością kreślenia oraz małą przydatnością wynikającą z nieczytelności źle rysowanych schematów. Nie ulega wątpliwości, że źle sporządzony schemat kanoniczny jest mało przydatny dla praktyki. Znane są jednak ogromne zalety tego schematu oraz jego przydatność przy kierowaniu przewietrzaniem kopalni [41,43,21,25, 126]. Analizę przewietrzania kopalni dla sytuacji normalnych i awaryjnych o wiele łatwiej i szybciej można przeprowadzić dysponując schematami:

przestrzennym, kanonicznym i potencjalnym. Sporządzanie schematu potencjalnego jest łatwiejsze, gdy wcześniej wykonany jest schemat kanoniczny. Duża uciążliwość rysowania schematu może być zmniejszona poprzez wykorzystanie komputera przeprowadzającego analizę struktury sieci. Można nawet uważać, że w przyszłości taki schemat lub informacje wynikające z jego analizy będą opracowywane i przechowywane w komputerze. W razie potrzeby schemat można będzie odwzorować na ekranie monitora lub poprzez plotery narysować na papierze. Aktualnie w niektórych kopalniach w ten sposób rysowane są schematy przestrzenne. Niektóre właściwości sieci wynikające z jej struktury dostrzec można analizując schemat przestrzenny. Najlepiej jednak właściwości te są widoczne na odwikłanym, jednoznacznym schemacie kanonicznym [25,91,120,126]. Dalsze przekształcenia tego schematu, w których bocznicom sieci przyporządkowuje się wybrane wielkości związane z przepływem powietrza, prowadzą do schematu ilościowego, potencjalnego, mocy.

W nowszych badaniach struktury sieci podejmowane są próby interpretacji sieci jako obiektu nie w pełni rozpoznawalnego z uwagi na istnienie przepływów powietrza przez zroby, szczeliny w górotworze, wyrobiska odizolowane itp. [126]. Definiuje się stopień przynależności elementów do sieci, co prowadzi do posługiwania się tzw. grafem rozmytym, siecią rozmytą. W interpretacji graficznej schematu elementom sieci przyporządkowano różny sposób rysowania, np. poprzez zmienną grubość linii reprezentującej dany element, wynikającą ze stopnia przynależności do sieci. Taki kierunek postępowania w rozwijaniu sposobów odwzorowania sieci jest niewątpliwie przydatny w praktyce. Sieć wentylacyjna kopalni jest bowiem tworzona przez człowieka, a także przez przyrodę, co często znacznie utrudnia formalny opis zachodzących procesów.

Inny kierunek badań struktury sieci to oceny liczbowe struktury. Wybrane właściwości sieci oceniane dotychczas w sposób intuicyjny są definiowane i wyznaczane przez obliczanie różnych wskaźników, miar, współczynników, itp. [126]. Pozwala to na ocenę różnych struktur, porównywanie, precyzowanie wniosków dotyczących poprawności struktury w związku z zadaniami pełnionymi przez sieć.

Rozwój techniki komputerowej na pewno wpłynie na przyspieszenie prowadzenia dalszych prac badawczych dotyczących funkcjonowania systemu wentylacyjnego kopalni, w tym także sieci wentylacyjnej i jej struktury. Opracowywane są bardziej dokładne metody, algorytmy i programy symulacji przepływu powietrza dla warunków normalnych i awaryjnych [46,136]. Istnieje możliwość poszerzenia zakresu precyzowanych dotychczas [97,121] zagadnień

obliczeniowych sieci. Na pewno rozwijane będą badania niezawodności funkcjonowania systemu. Pojawiają się prace, w których metody komputerowe wykorzystywane są do analizy i oceny niektórych właściwości struktury sieci wentylacyjnej kopalni [91,125].

Przytoczone uwagi o przydatności schematu kanonicznego i celowości ułatwienia prac związanych z kreśleniem tego schematu, a także niewątpliwy wpływ struktury sieci na wrażliwości wydatków prądów powietrza przy zmianach oporów bocznic skłoniły do opracowania metod, algorytmów i programów komputerowych badania niektórych właściwości struktury sieci i bocznic tworzących tę strukturę.

W następnych rozdziałach pracy wykażemy prawidłowości co do wrażliwości wydatków powietrza w zależności od klasy sieci. Znane kryteria podziału sieci oraz opracowane dalej algorytmy i programy zezwolą na zaliczanie sieci ze względu na jej strukturę do odpowiedniej klasy. Określony zostanie także charakter poszczególnych bocznic.

W sieciach wentylacyjnych kopalń wyróżnia się tzw. bocznice normalne, posiadające określony kierunek przepływu powietrza oraz bocznice przekątne, w których kierunek przepływu jest uzależniony od oporów pozostałych bocznic. Występowanie lub brak bocznic przekątnych w sieci wykorzystuje się jako kryterium podziału sieci na:

- sieci normalne,
- sieci przekątne.

W sieciach przekątnych występują bocznice normalne i przekątne. Dla praktyki interesujące są metody określania charakteru poszczególnych bocznic. Zagadnienie to będzie poruszone w rozdziałach 2.5, 2.8.

Inną cechą sieci jest występowanie podsieci. Można więc na podstawie tego kryterium wyróżnić:

- sieci, w których nie występują podsieci,
- sieci z podsieciami.

Często dla ułatwienia analiz sieci lub podsieci przeprowadza się redukcję podsieci, co prowadzi do tzw. sieci zredukowanej [23], lub otoczenie podsieci zastępuje się jednym elementem, co ułatwia przeprowadzanie analiz w podsieci [72,55,74,57,125]. Zagadnienie to zostanie omówione w rozdziale 2.6, gdzie sprecyzowana będzie także zastosowana terminologia.

Następną istotną cechą struktury sieci jest możliwość odwzorowania na płaszczyźnie bez pozornych przecięć bocznic, czyli planarność sieci. Z uwagi na to kryterium wyróżnia się:

- sieci płaskie,
- sieci niepłaskie.

Opis opracowanej w pracy metody rozstrzygającej o płaskości sieci podany zostanie w rozdziale 2.7.

Przy badaniu wrażliwości istotne będą relacje określone na zbiorze bocznic. W rozdziale 2.9 przeanalizowane zostaną dotychczas zaproponowane klasyfikacje połączeń bocznic. Wskażemy także na możliwość wprowadzenia innej klasyfikacji dla par bocznic. Zaproponowana nowa klasyfikacja połączeń będzie korespondowała ze znakami wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic.

2.2. Wyznaczanie warstw węzłów w sieci

W niniejszym rozdziale zwrócimy uwagę na możliwość określenia współrzędnej węzła na schemacie kanonicznym wzdłuż osi pionowej. Wykorzystana będzie relacja starszeństwa węzłów w sieci. Istnienie takiej relacji dostrzeżono już dawno. Zaproponowana została odpowiednia numeracja węzłów: "węzły numeruje się tak, że wszystkie prądy w sieci wentylacyjnej płyną w poszczególnych bocznicach od węzła o numerze niższym do węzła o numerze większym" [25]. Obecnie stosowanie takiej numeracji stwarzałoby duże utrudnienia. Przy zmieniającej się strukturze sieci zachodzi konieczność wprowadzania nowych węzłów i wyrzucania węzłów związanych z wyrobiskami likwidowanymi. Wiązałoby się to z koniecznością częstego wprowadzania nowej numeracji, co byłoby kłopotliwe. Obecnie stosowane metody zapisu struktury i obliczeń numerycznych sieci nie wymagają zachowania narastających numerów węzłów wzdłuż drogi przepływu powietrza. Relacja starszeństwa węzłów nadal jednak występuje. Wprowadzony dalej podział zbioru węzłów na tzw. warstwy (poziomy) będzie przydatny w wielu algorytmach badania struktury sieci.

Zasadniczym celem funkcjonowania kopalnianej sieci wentylacyjnej jest czerpanie świeżego powietrza z atmosfery, dostarczanie go do miejsc zagrożonych w kopalni i usuwanie powietrza zanieczyszczonego (zużytego) do atmosfery. Przepływ powietrza przez sieć rozpoczyna się więc i kończy w atmosferze. Nawet przy kilku bocznicach doprowadzających świeże powietrze do kopalni można uważać, że przepływ ten rozpoczyna się w jednym węźle, zwanym dalej węzłem początkowym sieci w_{ps}. (W teorii sieci transportowych węzeł ten nazywany jest węzłem źródłowym). Podobnie wszystkie wypływy powietrza z sieci do atmosfery można zlepić w jeden węzeł wylotowy, nazywany dalej węzłem końcowym sieci w_{ks}. W niektórych zagadnieniach sieciowych węzły początkowy w_{ps} i końcowy w_{ks} łączy się z sobą bocznicą

o nieskończonej przepustowości, która w modelu sieci reprezentuje atmosferę [17]. Bocznica ta nazywana jest bocznicą zamykającą, a schemat kanoniczny narysowany z tą bocznicą - schematem zamkniętym.

Przepływ powietrza przez sieć wymuszany jest przede wszystkim dzięki pracy wentylatorów głównych. W polskich kopalniach węgla przepisy wymagają, by wentylatory te były zainstalowane na powierzchni przy szybach wydechowych. W tej sytuacji cykl wewnętrzny, w którym wszystkie bocznice posiadają kierunek przepływu zgodny (lub niezgodny) z orientacją tego cyklu, może wystąpić w sieci wyłącznie wskutek pojawienia się dodatkowych depresji naturalnych lub pożarowych. Taki stan w sieci można uważać za nienormalny (cyrkulacja powietrza w cyklu wewnętrznym). Uwzględniając w stanie normalnym kierunki przepływu powietrza uzyskiwane wskutek pracy wentylatorów głównych można bocznicom sieci nadać orientację spełniającą wymogi tzw. grafów acyklicznych w sensie dróg [75]. Oznacza to, że w sieci nie występuje cykl wewnętrzny ze zgodną orientacją tworzących go bocznic. Przypadkowa, błędna orientacja bocznic (nie spełniająca wyżej wymienionego warunku) może być wykryta przez odpowiedni podprogram kontrolujący poprawność orientacji bocznic przy każdym węźle oraz w poszczególnych drogach skierowanych od węzła początkowego sieci w_{ps} do węzła końcowego sieci w_{ks}. Przez drogę skierowaną od węzła w_i do węzła w_j będziemy rozumieli ciąg występujących na przemian węzłów i bocznic rozpoczynający się od węzła w_i, a kończący się w węźle w_j, w którym żaden węzeł nie pojawia się więcej niż jeden raz oraz orientacja bocznic jest zgodna z orientacją drogi. Przyjęcie założenia o acykliczności sieci w sensie dróg jest bardzo przydatne, ponieważ można wtedy stosować aparat matematyczny teorii grafów skierowanych acyklicznych. Dodajmy także, że założenie to nie ogranicza możliwości stosowania większości przedstawionych algorytmów w przypadkach, gdy w sieci występuje recyrkulacja, ponieważ dotyczy orientacji bocznic, a nie rzeczywistych kierunków przepływu.

W grafach acyklicznych można wyróżnić tzw. poziomy (warstwy) [75]. Wyznaczanie warstw ułatwia analizę grafu i pomaga w rozwiązywaniu wielu problemów praktycznych. Zauważono to w pracy [91], w której wykorzystano relację starszeństwa węzłów w sieci do rozbicia zbioru węzłów na rozłączne podzbiory przydatne przy rysowaniu schematu kanonicznego. Warstwą grafu $G = \langle W, \Gamma \rangle$ nazywa się podzbiór $W_k \subset W$; $k = 1,2,\ldots,K$ zbioru wierzchołków grafu określony następująco [75]:

1) do W_1 (warstwy pierwszej) należą takie wierzchołki "w" grafu, dla których $\Gamma^{-1}(w) = \emptyset$ (zbiór poprzedników "w" jest pusty). Warunek ten spełniony jest dla węzła w_{ps} po odrzuceniu bocznicy zamykającej,

2) wierzchołek "w" należy do W_k, k > 1, jeżeli
$\Gamma^{-1}(w) \subset \{ W_1 \cup W_2 \cup \ldots \cup W_{k-1} \}$,

3) jeżeli $w \in W_k$, k > 1 to $\Gamma^{-1}(w) \cap W_{k-1} \neq \emptyset$ (każdy wierzchołek, który ma poprzedniki i jest w k-tej warstwie, musi mieć przynajmniej jeden ze swoich poprzedników w warstwie bezpośrednio poprzedzającej k-1),

gdzie:

W - zbiór węzłów (wierzchołków) grafu G,

W_k - zbiór węzłów k-tej warstwy grafu,

$\Gamma(w)$, $\Gamma^{-1}(w)$ - zbiór następników i poprzedników węzła "w".

W pracach [75,91] podano prosty algorytm wyznaczania warstw W_k dla przypadku, gdy można posługiwać się pełną (binarną) macierzą przejść $\mathbb{A}$. Algorytm ten ma charakter rekurencyjny i polega na tworzeniu kolejnych podgrafów powstających przez usuwanie wierzchołków, które nie posiadają poprzedników. W zagadnieniach sieci wentylacyjnej kopalni duża liczba węzłów i bocznic (kilkaset) powoduje, że posługiwanie się pełną macierzą połączeń $\mathbb{P}$ lub pełną macierzą przejść $\mathbb{A}$ jest utrudnione ze względu na duże wymiary tych macierzy. W algorytmach grafowych dla bardzo dużych zbiorów używana jest macierz połączeń $\mathbb{P}'$ w formie skróconej (tab. 2.2.1). Algorytm wyznaczania warstw (poziomów) wymagał więc modyfikacji. Zasadnicze etapy tego algorytmu po modyfikacji są następujące:

- czytanie zbioru wejściowego typu ms-... (w zbiorze tym zapisana jest struktura sieci przez podanie węzła początkowego w_p i końcowego w_k każdej bocznicy),
- likwidacja bocznicy zamykającej,
- utworzenie skróconej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$,
- założenie pierwszego poziomu (warstwy) k:=1,
  - wyszukanie w macierzy $\mathbb{P}'$ wierszy, w których nie występują węzły ze znakiem "-",
  - węzły, których wiersze spełniają wyżej wymieniony warunek umieszczamy w poziomie k,
  - w macierzy $\mathbb{P}'$ w poszczególnych wierszach skreślamy węzły poziomu k,
  - w macierzy $\mathbb{P}'$ skreślamy wiersze węzłów poziomu k,
  - czy w macierzy $\mathbb{P}'$ są jeszcze wiersze ?
    - tak
    - k:= k+1
    - nie
    - sporządzenie i zapisanie zbioru wynikowego, koniec programu

Pierwsze trzy etapy przebiegu algorytmu dla przykładu sieci z rys. 2.2.1 podano w tab. 2.2.1.

Tabela 2.2.1

Przykład przekształcania skróconej macierzy połączeń P' przy wyznaczaniu warstw (poziomów) schematu kanonicznego sieci z rys. 2.2.1

etap 1; k=1	etap 2; k=2	etap 3; k=3
~~1: 2, -12,~~		
2: 3, 4, ~~-1~~	~~2: 3, 4,~~	
3: 5, 6, 7, -2,	3: 5, 6, 7, ~~-2,~~	~~3: 5, 6, 7,~~
4: 5, 8, -2,	4: 5, 8, ~~-2,~~	~~4: 5, 8,~~
5: 8, -3, -4,	5: 8, -3, -4,	5: 8, ~~-3~~, ~~-4~~,
6: 7, 9, -3,	6: 7, 9, -3,	6: 7, 9, ~~-3~~
7: 9, 10, -3, -6,	7: 9, 10, -3, -6,	7: 9, 10 ~~-3~~, -6,
8: 9, -4, -5,	8: 9, -4, -5,	8: 9, ~~-4~~, -5,
9: 10, -6, -7, -8,	9: 10, -6, -7, -8,	9: 10, -6, -7, -8,
10: 12, -7, -9,	10: 12, -7, -9,	10: 12, -7, -9,
12: ~~1~~, -10,	12: -10,	12: -10,
w poziomie 1: w1	w poziomie 2: w2	w poziomie 3: w3, w4

Schemat kanoniczny narysowany według wskazówek programu PKSK wykorzystującego przedstawiony algorytm pokazano na rys. 2.2.1b. Węzły narysowane są na wysokości odpowiadającej numerowi warstwy, do której zostały zaliczone. Numer ten jednocześnie przedstawia liczbę węzłów w najdłuższej drodze skierowanej od węzła początkowego sieci $w_{ps} = 1$ do danej warstwy. Najdłuższa droga przez sieć do warstwy 8, czyli do węzła końcowego sieci $w_{ks} = 12$ zawiera 8 węzłów i 7 bocznic. Określona więc została miara wzdłuż wprowadzonej osi pionowej schematu kanonicznego. Miarę tę, poziom węzła w skrócie $poz(w_i)$, można traktować jako współrzędną węzła wzdłuż tej osi:

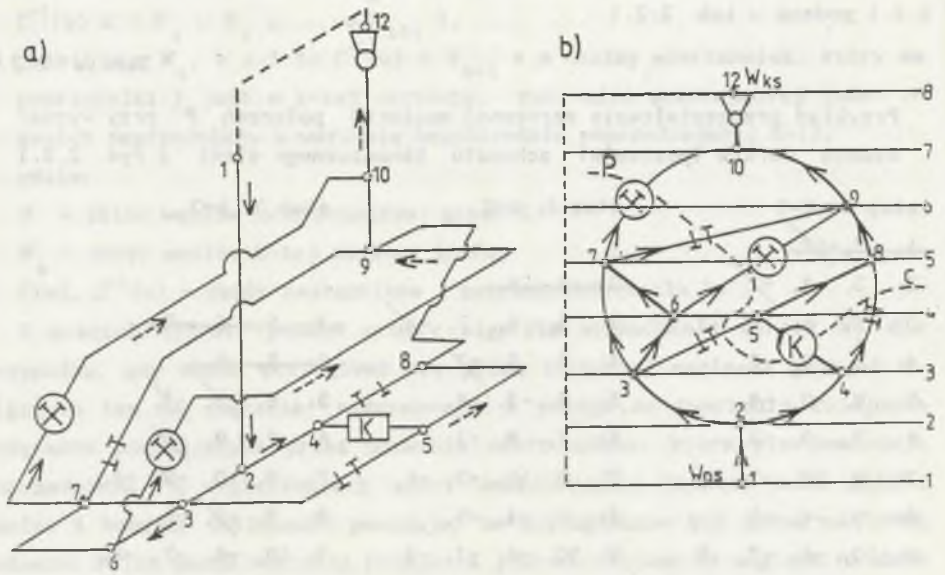
$$\bigwedge_{w_i} poz(w_i) = k \quad \text{gdy} \quad w_i \in W_k \tag{2.2.1}$$

$i = 1,2,\ldots,n$ n - liczba węzłów w sieci,

$k = 1,2,\ldots,K$ K - liczba warstw węzłów w sieci równa liczbie węzłów w najdłuższej drodze od węzła początkowego w_{ps} do węzła końcowego w_{ks} sieci.

Każdej bocznicy b_i można przyporządkować "skok" równy różnicy poziomów węzła końcowego w_k i początkowego w_p:

$$skok(b_i) = poz(w_k) - poz(w_p) \tag{2.2.2}$$

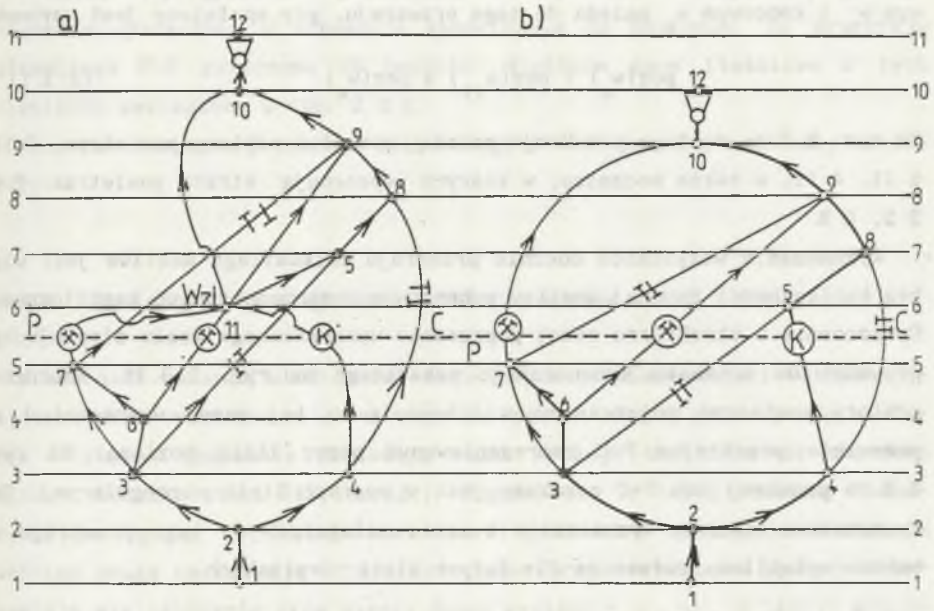


Rys. 2.2.1. Przykład schematu przestrzennego (a) i kanonicznego (b) narysowanego wg wskazówek programu PKSK

Fig. 2.2.1. Example of a space diagram (a) and canonic diagram (b) plotted with instructions of the PKSK program

2.3. Przekrój całkowity przez sieć poprowadzony przez bocznice-odbiory powietrza

W schemacie kanonicznym (rys. 2.2.1b) bocznice-odbiory powietrza (ściany, komory) znajdują się na różnych wysokościach schematu. W niektórych zagadnieniach nie jest to istotne. Często jednak w praktyce dla dużych rzeczywistych sieci schemat staje się bardziej przejrzysty, gdy bocznice-odbiory umieszczone są na rysunku na tej samej wysokości. Cel ten można osiągnąć poprzez małą modyfikację algorytmu przedstawionego w poprzednim rozdziale. W przypadku gdy interesuje nas postać schematu z odbiorami na tej samej wysokości, w algorytmie wprowadza się roboczą zmianę struktury poprzez podzielenie każdej bocznicy-odbioru na dwie bocznice (rys. 2.3.1a) Węzeł dzielący każdą taką bocznicę posiada ten sam numer, co prowadzi do zlepienia bocznic-odbiorów nowo wprowadzonym węzłem. Wzrasta wtedy liczba bocznic sieci o liczbę równą liczbie bocznic odbiorów oraz wzrasta liczba węzłów w sieci o 1. Ten pośredni etap zmiany struktury pokazano na rys. 2.3.1a, gdzie węzłem zlepiającym bocznice-odbiory jest węzeł 11. Dal-



Rys. 2.3.1. (a) Podział i zlepienie bocznic-odbiorów powietrza w węźle 11, (b) Przekrój całkowity P-C wg programu PKSK

Fig. 2.3.1. (a) Distribution and agglutination of air-consuming branches in node 11, (b) Full cross-section P-C in compliance with the PKSK program

szy przebieg algorytmu do wyznaczenia warstw (poziomów) jest identyczny z poprzednim. Powstaje także warstwa, w której znajduje się węzeł zlepiający w_{zl}. Na rys. 2.3.1.a jest to warstwa 6. Wszystkie węzły początkowe bocznic-odbiorów znajdują się poniżej węzła zlepiającego, wszystkie węzły końcowe bocznic-odbiorów znajdują się powyżej węzła zlepiającego. Istnieje zatem przekrój poziomy P-C przez schemat kanoniczny, przecinający wszystkie bocznice-odbiory, a także przecinający pozostałe bocznice rozciągnięte w schemacie między strefą prądów świeżych i zużytych.

Przekroje przez sieć wentylacyjną do aerologii górniczej wprowadził S. Barczyk [9]. Nazywał je także przekrojami kanonicznymi. Istnieje możliwość konstruowania różnych rodzajów przekrojów. Prawo Kirchhoffa dla węzłów sieci można także sformułować wykorzystując przekroje niezależne w sieci.

W niniejszym rozdziale wykorzystamy przekrój całkowity przez sieć poprowadzony przez odbiory powietrza. Przekrój ten P-C (rys. 2.3.1a) może być poprowadzony przez schemat pomiędzy poziomem, na którym jest położony węzeł zlepiający w_{zl}, a poziomem niższym o jeden. (Istnieje także możli-

wość obrania innego położenia tego przekroju). Bocznice o węźle początkowym w_p i końcowym w_k należą do tego przekroju, gdy spełniony jest warunek:

$$poz(w_p) < poz(w_{zl}) \leq poz(w_k) \qquad (2.3.1)$$

Na rys. 2.3.1a do tego przekroju należą bocznice-odbiory powietrza: 7 11, 6 11, 4 11, a także bocznice, w których występują straty powietrza: 7 9, 3 5, 4 8.

Wyznaczanie wszystkich bocznic przekroju całkowitego możliwe jest więc bez konieczności żmudnej analizy schematu przestrzennego lub kanonicznego. Opuszczenie w strukturze sieci poprzednio wprowadzonego węzła zlepiającego prowadzi do schematu kanonicznego pokazanego na rys. 2.3.1b. Bocznice-odbiory powietrza położone są w schemacie na tej samej wysokości i są przecięte przekrojem P-C reprezentowanym przez linię poziomą. Na rys. 2.2.1b przekrój ten P-C pokazany jest w postaci linii nieregularnej. Dotychczasowe sposoby wyznaczania bocznic należących do tego przekroju są bardzo uciążliwe, zwłaszcza dla dużych sieci niepłaskich.

Tabela 2.3.1

Wybrane dane o grupach bocznic należących do przekroju całkowitego P-C poprowadzonego przez odbiory powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni "K"

	Grupa bocznic przekroju całkowitego	Liczba bocznic w grupie	Suma wydatków powietrza m^3/min	Udział procentowy w wydatku całkowitym
1.	Ściany czynne i rezerwowe	22	11729	31.8%
2.	Bocznice z ucieczkami w oddziałach	16	2378	6.4%
3.	Komory	8	6908	18.7%
4.	Bocznice z ucieczkami pozarejonowymi	50	13547	36.7%
5.	Straty zewnętrzne	3	2364	6.4%
	Razem w przekroju p-c	99	36926	100%

Opracowany algorytm i program komputerowy mogą więc znacznie ułatwić analizę niektórych zagadnień związanych z rozprowadzeniem powietrza w kopalni, zwłaszcza analizę gospodarki powietrzem. W tabeli 2.3.1 podajemy przykład wyników takiej analizy przeprowadzonej dla wybranej kopalni "K".

W sieci występowało 608 bocznic, 378 węzłów, 3 wentylatory główne. Programem wyznaczono w schemacie kanonicznym 60 poziomów. Do przekroju całkowitego P-C zaliczono 99 bocznic. Niektóre dane ilościowe o tych bocznicach zestawiono w tab. 2.3.1.

Inne zastosowania przekroju całkowitego podane zostaną w dalszej części pracy.

2.4. Dostępność i osiągalność w zbiorze węzłów sieci

W metodach badania właściwości struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej oraz przy wyznaczaniu stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza istotne znaczenie posiadają różne relacje określone na zbiorach węzłów i bocznic sieci [85,132,121]. Zagadnienie to dalej będziemy rozpatrywać posługując się kategoriami teorii grafów. W niniejszym rozdziale zwrócimy uwagę na relacje w zbiorze węzłów, przy określaniu których wykorzystuje się istnienie dróg między dwoma węzłami - w_i, w_j. W teorii grafów używane są określenia - dostępność i osiągalność, przy czym większość autorów stosuje je zamiennie [45,80]. W niniejszej pracy będziemy używać określeń dostępność oraz osiągalność traktując te określenia nie jako synonimy.

Relacja dostępności określona jest na iloczynie kartezjańskim zbioru węzłów. Wykorzystuje się tu istnienie lub brak drogi od węzła w_i do węzła w_j. Będziemy uważali, że węzeł w_j jest dostępny z węzła w_i wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje w grafie droga od węzła w_i do węzła w_j [80]. Drogę tę oznaczać będziemy przez $w_i \rightarrow w_j$. Można zatem mówić o macierzy dostępności $\mathbb{D} = [d_{ij}]$ $i,j = 1,2,\ldots,n$, której elementy d_{ij} przyjmują wartości 1 lub 0 w zależności od tego, czy istnieje droga $w_i \rightarrow w_j$ lub brak jest takiej drogi.

Przydatne jest także posługiwanie się zbiorem V_i^+ węzłów osiągalnych z węzła w_i. Należą do niego te węzły w_j, dla których w i-tym wierszu macierzy $\mathbb{D}$ wyrazy d_{ij} są różne od 0. W podobny sposób definiuje się zbiór V_i^- węzłów, z których można osiągnąć węzeł w_i. Istotne jest wtedy występowanie dróg $w_j \rightarrow w_i$. W macierzy $\mathbb{D}$ węzły te uwidaczniają się poprzez $d_{ji} = 1$ w i-tej kolumnie. W teorii grafów skierowanych znane są algorytmy umożliwiające wyznaczanie binarnej macierzy dostępności $\mathbb{D}$, a tym samym zbiorów V_i^+ oraz V_i^- [75]. W pierwszej kolejności z binarnej pełnej macierzy przejść $\mathbb{A}$ poprzez dodanie macierzy jednostkowej (z jedynkami na głównej przekątnej) tworzona jest macierz $\mathbb{B}$. Następnie oblicza się kolejne potęgi $\mathbb{B}^{(k)}$ macierzy $\mathbb{B}$. Dla pewnego k $\mathbb{B}^{(k)} = \mathbb{B}^{(k+1)}$. Wykazuje się, że $\mathbb{D} = \mathbb{B}^{(k)}$. Dla dużych

sieci wentylacyjnych kopalń algorytm ten prawdopodobnie jest mało przydatny z uwagi na uciążliwe mnożenie i porównywanie macierzy o dużych wymiarach. Dlatego też w pracy ze względu na spodziewaną dużą przydatność macierzy dostępności $\mathbb{D}$ (oraz macierzy osiągalności $\mathbb{L}$) podjęto próbę opracowania innego algorytmu wyznaczania tych macierzy.

Jak już wspomniano, graf skierowany reprezentujący kopalnianą sieć wentylacyjną, po odrzuceniu bocznicy zamykajacej może być zorientowany zgodnie z wymogami grafów acyklicznych w sensie dróg. W poprzednich rozdziałach przedstawiono podział zbioru węzłów na tzw. warstwy. W tego rodzaju grafach zbiór V_i^+ węzłów dostępnych z węzła w_i pokrywa się ze zbiorem następników $\Gamma(w_i)$ węzła w_i, a także zbiór V_i^- węzłów, z których dostępny jest węzeł w_i, pokrywa się ze zbiorem $\Gamma^{(-1)}(w_i)$ poprzedników węzła w_i. Przy wyznaczaniu poszczególnych wierszy macierzy dostępności $\mathbb{D}$ skorzystać można z uporządkowania grafu w warstwy.

Uporządkowanie to wykorzystamy także przy wyznaczaniu poszczególnych wierszy macierzy osiągalności $\mathbb{L} = [osg(w_i,w_j)]$ $i,j = 1,2,\ldots,n$. Przez osiągalność $osg(w_i,w_j)$ rozumieć będziemy liczbę istniejących dróg w grafie acyklicznym od węzła w_i do węzła w_j:

$$osg(w_i,w_j) = \begin{cases} 0 \text{ - gdy nie istnieje droga od węzła } w_i \text{ do węzła } w_j \\ 1 \text{ - gdy występuje 1 dróg od węzła } w_i \text{ do węzła } w_j \end{cases} \qquad (2.4.1)$$

Osiągalność przynosi więc bogatszą informację od dostępności. Dla węzła końcowego sieci $w_{k=}$ znajdującego się w najwyższej K-tej warstwie (na najwyższym K-tym poziomie) wszystkie elementy odpowiedniego wiersza macierzy osiagalności $\mathbb{L}$ przyjmują wartość 0, ponieważ z tego węzła nie jest w sieci osiągalny żaden inny węzeł (rys. 2.2.1b). Węzły znajdujące się w warstwach niższych "dziedziczą" osiągalność swoich następników. Odpowiedni i-ty wiersz $\mathbf{l}_i$ macierzy osiągalności może być wyznaczony, gdy określona jest osiągalność dla wszystkich następników węzła w_i. Wskazuje to na przyjęcie porządku przy wyznaczaniu wierszy $\mathbf{l}_i$ macierzy osiągalności $\mathbb{L}$, a mianowicie porządek ten powieniem wynikać z ułożenia węzłów w warstwy. Dla dowolnego i-tego węzła znajdującego się w k-tej wartswie odpowiedni i-ty wiersz $\mathbf{l}_i$ macierzy osiągalnosci może być wyznaczony jako suma odpowiedniego i-tego wiersza $\mathbf{a}_i$ macierzy przejść $\mathbb{A}$ oraz wcześniej wyznaczonych wierszy $\mathbf{l}_j$ macierzy osiągalności węzłów, do których istnieje bezpośrednie przejście z i-tego węzła. Dodawanie tych wierszy macierzy osiągalności wynika z niezerowych elementów a_{ij} macierzy przejść $\mathbb{A}$:

$$l_i = a_i + \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot l_j \qquad (2.4.2)$$

Takie postępowanie prowadzi się rozpoczynając od warstwy najwyższej, w której występuje tylko węzeł końcowy sieci w_{ks} (dla którego, jak już wspomniano, odpowiedni wiersz macierzy osiągalności $\mathbb{L}$ posiada wszystkie wyrazy zerowe), poprzez kolejne warstwy, aż do węzła początkowego sieci w_{ps} znajdującego się w warstwie najniższej. Ilustruje to niżej podany przykład macierzy przejść $\mathbb{A}$ oraz wyznaczonej macierzy osiągalności $\mathbb{L}$ dla schematu z rys. 2.2.1b.

Tabela 2.4.1

Przykład wyznaczania pełnej macierzy osiągalności $\mathbb{L}$ z macierzy przejść $\mathbb{A}$ dla sieci z rys. 2.2.1b

$\mathbb{A} =$

w_i \ w_j	12	10	9	7	8	6	5	3	4	2	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

$\mathbb{L} =$

w_i \ w_j	12	10	9	7	8	6	5	3	4	2	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3	6	6	4	2	1	1	1	0	0	0	0
4	2	2	2	0	2	0	1	0	0	0	0
2	8	8	6	2	3	1	2	1	1	0	0
1	8	8	6	2	3	1	2	1	1	1	0

Skróconą postać zapisu informacji wynikających z macierzy dostępności i osiągalności podano w tabeli 2.4.2. Liczby w odpowiednim i-tym wierszu są numerami węzłów w_j dostępnych z węzła w_i. Liczby w nawiasach są poszukiwanymi osiągalnościami $osg(w_i, w_j)$. Informacje te mogą być wcześniej przygotowane i wykorzystane przy wyznaczaniu stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza w sieci (np. przy wyznaczaniu strefy bezpośredniego zadymienia przy pożarach, gdy znane jest miejsce wystąpienia pożaru).

Przedstawiony opis algorytmu wyznaczania dostępności i osiągalności w zbiorze wezłów sieci łatwo można oprogramować. Odpowiedni podprogram został włączony do jednego z programów analizujących strukturę sieci.

W przypadku dużych sieci z uwagi na ograniczoną pamięć komputera wygodniejsze jest posługiwanie się skróconymi zapisami macierzy przejść A i osiągalności L, co uwzględniono w odpowiednim programie.

Tabela 2.4.2

Dostępność i osiągalność w zbiorze węzłów sieci
(zapis skrócony dla przykładu z rysunku 2.2.1b)

w_i										
1:	2(1)	3(1)	4(1)	5(2)	6(1)	7(2)	8(3)	9(6)	10(8)	12(8)
2:	3(1)	4(1)	5(2)	6(1)	7(2)	8(3)	9(6)	10(8)	12(8)	
3:	5(1)	6(1)	7(2)	8(1)	9(4)	10(6)	12(6)			
4:	5(1)	8(2)	9(2)	10(2)	12(2)					
5:	8(1)	9(1)	10(1)	12(1)						
6:	7(1)	9(2)	10(3)	12(3)						
7:	9(1)	10(2)	12(2)							
8:	9(1)	10(1)	12(1)							
9:	10(1)	12(1)								
10:	12(1)									
12:										

Warto także zwrócić uwagę na fakt, iż wyznaczona przedstawionym algorytmem macierz osiągalności L nie jest macierzą binarną. Algorytm stwierdza istnienie drogi od węzła w_i do węzła w_j, a także wyznacza liczbę wszystkich dróg od w_i do w_j. Liczba tych dróg będzie przydatna w dalszych metodach badania struktury sieci.

W przykładzie przedstawionym na rys. 2.2.1b od węzła początkowego sieci 1 do węzła końcowego sieci 12 stwierdzono istnienie ośmiu różnych dróg (tab. 2.4.1, 2.4.2) zgodnych z przyjętą orientacją bocznic. Analiza osiągalności przeprowadzona dla sieci wentylacyjnej wybranej kopalni "K", w której występuje 614 bocznic i 382 węzły pozwoliła na stwierdzenie istnienia około 8700 dróg między węzłem początkowym i końcowym sieci. Czas pracy komputera typu IBM z zegarem 33 MHz wynosił kilkanaście sekund.

Poprawność przedstawionej metody wyznaczania macierzy osiągalności L skontrolowano innymi algorytmami wyznaczającymi drogi w grafach. Stwierdzono identyczność uzyskiwanych wyników. Macierz dostępności D, jak już wspomniano, jest macierzą binarną. Może być wyznaczana z macierzy osiągalności L przez zastąpienie elementów niezerowych liczbą 1 lub bezpośrednio po małej modyfikacji przedstawionego algorytmu.

2.5. Redukcja połączeń szeregowo - równoległych

W trakcie badania właściwości bocznic i struktur kopalnianych sieci wentylacyjnych dążyć będziemy do upraszczania struktury i wyznaczania tzw. sieci lub podsieci o strukturach zredukowanych [23]. Wykorzystywać będziemy znane właściwości połączenia szeregowego i równoległego bocznic oraz występowanie podsieci.

W modelu cyfrowym struktury sieci niekiedy wprowadza się półwęzły w celu uwypuklenia różnych cech (np. przepływowych) poszczególnych odcinków danego wyrobiska. Wynikać to może z celowości wyróżnienia w obliczeniach np. spiętrzenia wentylatora, spadku naporu powietrza w wyrobisku, spadku naporu na tamie itp. Półwęzły dzielą wtedy wyrobisko na kilka bocznic. Przy analizie struktury sieci występowanie półwęzłów może być pominięte, a bocznice tworzące połączenie szeregowe mogą być zastąpione jedną bocznicą.

Podobne przekształcenie struktury sieci może być przeprowadzone dla bocznic tworzących połączenia równoległe. Te właściwości sieci wykorzystuje się np. przy rozwiązywaniu sieci normalnych [21], gdzie wyznacza się otwór równoznaczny zastępczy bocznicy, która zastępuje bocznice równoległe. Ciąg przekształceń struktury sieci oraz obliczeń oporów i otworów równoznacznych zastępczych pozwala na wyznaczenie oporu całkowitego sieci normalnej (w której pracuje jeden wentylator). W pracy [124] pokazano, że przekształcenia struktury sieci polegające na zastępowaniu połączeń równoległych i szeregowych są względem siebie dualne. Możliwe jest także wyznaczanie charakterystyk zastępczych połączeń bocznic, w których występują opory i wentylatory w przypadkach, gdy bocznice te tworzą połączenia szeregowo-równoległe [18,28].

Wykrywanie połączeń szeregowych i równoległych bocznic przy upraszczaniu struktury sieci jest czynnością łatwą. Operację tę można wykonać dysponując schematem przestrzennym lub kanonicznym sieci. Jedyne utrudnienie może wynikać z wielkości sieci, ponieważ wydłuża się wtedy czas analizy. Dla sieci, której model cyfrowy jest już opracowany, wykrywanie oraz zastępowanie połączeń równoległych i szeregowych może być realizowane przez odpowiedni podprogram. Wykorzystuje się wtedy właściwości odpowiednich wierszy macierzy strukturalnych sieci, np. skróconej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$. Redukcja połączenia szeregowego lub równoległego polega na odpowiedniej modyfikacji tej macierzy.

Gdy analizowana sieć posiada strukturę szeregowo-równoległą (sieci normalne), to w końcowym etapie redukcji w macierzy $\mathbb{P}'$ występują dwie bocznice, a mianowicie bocznica zamykająca oraz bocznica zastępcza, reprezentująca całą sieć. Bez trudu można więc odpowiednim algorytmem rozstrzygnąć o strukturze szeregowo-równoległej sieci.

Występowanie w analizowanej sieci bocznic przekątnych powoduje, że na pewnym etapie redukcji połączeń równoległych i szeregowych w przekształcanej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$ nie występują już wiersze charakterystyczne dla połączenia równoległego lub szeregowego. Wyciąga się stąd wniosek, że analizowana sieć jest siecią przekątną. Uzyskuje się w ten sposób zakwalifikowanie danej sieci do klasy sieci normalnych lub do klasy sieci przekątnych.

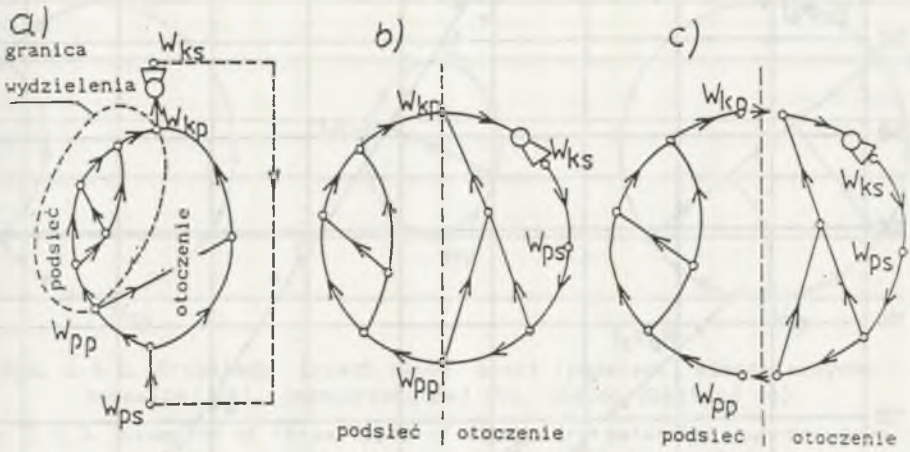
2.6. Istnienie i wydzielanie podsieci. Sieć zredukowana

Dalszą istotną cechą struktury sieci jest występowanie podsieci [23, 121, 126, 74]. W sieci można wyróżnić dużo charakterystycznych fragmentów. Niektóre z nich posiadają szczególne właściwości. Między innymi wyróżnić można fragmenty posiadające dwa węzły wspólne z resztą sieci (rys. 2.6.1). Zagadnienie definiowania i wydzielania takich części sieci zostało poruszone w pracy [121]. Podsiecią wentylacyjną kopalnianej sieci wentylacyjnej nazywa się taki podgraf lub graf częściowy G_p grafu G_0 tworzącego sieć, posiadający dokładnie dwa węzły wspólne z resztą sieci, który spełnia warunki definicyjne sieci dla tej właśnie pary wierzchołków w_i, w_j, tzn.:

$$\text{- w grafie } G_p \quad \Gamma^{-1}_{w_i} = \emptyset \quad \text{oraz} \quad \Gamma_{w_j} = \emptyset$$

Węzeł w_i nazywać będziemy węzłem początkowym podsieci w_{pp} (rys. 2.6.1). Można go także kojarzyć z wlotem do podsieci. Węzeł w_j nazywać będziemy węzłem końcowym podsieci w_{kp}. Można go także kojarzyć z wylotem z podsieci. Istnienie odpowiednich zbiorów następników Γ i poprzedników Γ^{-1} węzłów w_{pp} i w_{kp} lub brak elementów w tych zbiorach wiąże się oczywiście z wcześniejszym przyjęciem orientacji bocznic zgodnej z wymogami grafów acyklicznych w sensie dróg.

Wydzielanie podsieci pociąga za sobą powstawanie tzw. reszty sieci (rys. 2.6.1). Do tej części należą te elementy sieci, które nie należą do podsieci. W pracy [121] reszta sieci nazywana jest otoczeniem podsieci. Otoczenie jest dopełnieniem podsieci do całej sieci.



Rys. 2.6.1. Wydzielenie podsieci i otoczenia

Fig. 2.6.1. Separation of a sub-network and its environment

W pracach [72,73,74,57,125] wykazano istnienie charakterystyk zastępczych podsieci $W_z = f(\dot{V}_z)$ oraz otoczenia $H_z = f(\dot{V}_z)$, gdzie:

W_z - zastępczy spadek naporu powietrza w podsieci,

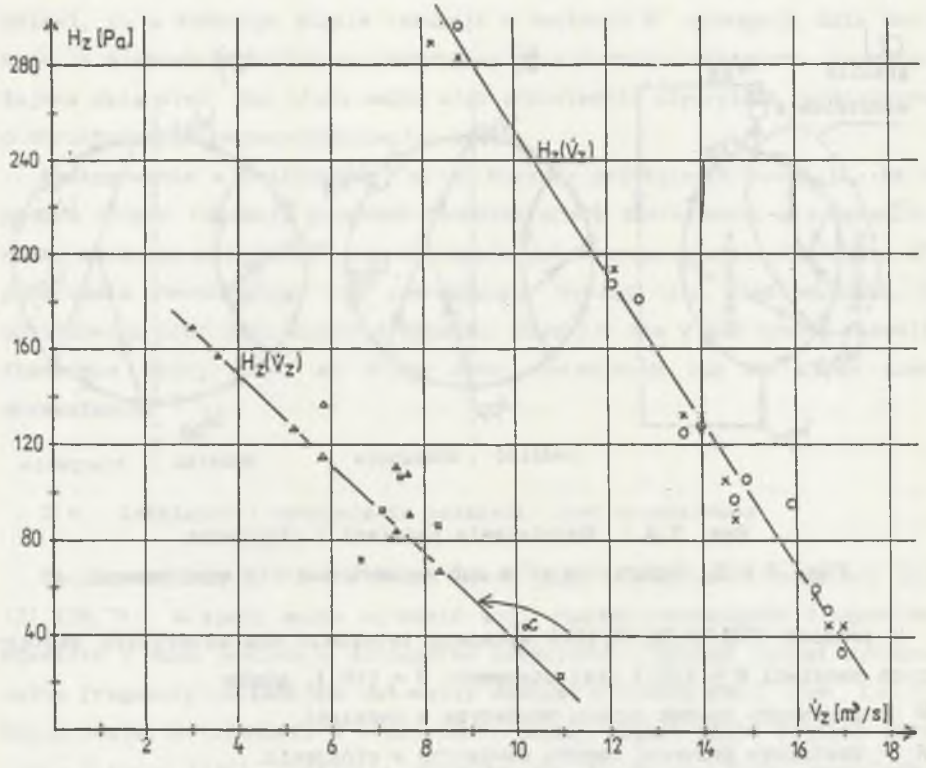
H_z - zastępczy przyrost naporu powietrza w otoczeniu,

$\dot{V}_z$ - zastępczy wydatek powietrza w podsieci lub otoczeniu.

W przypadku gdy w podsieci występują tylko bocznice pasywne, charakterystyka podsieci przyjmuje postać $W_z = R_z \cdot \dot{V}_z^2$, gdzie R_z jest oporem zastępczym podsieci. Występowanie elementów aktywnych w podsieci (wentylatorów) powoduje, że charakterystyka zastępcza tej części sieci nie jest już parabolą.

W otoczeniu zawsze występują elementy pasywne i aktywne (opory i wentylatory). Charakterystykę zastępczą tej części sieci utożsamiać można z charakterystyką fikcyjnego wentylatora wymuszającego przepływ powietrza w podsieci (rys. 2.6.1c, 2.6.2).

Posiadanie informacji o przebiegu charakterystyk zastępczych podsieci lub otoczenia pozwala na zastąpienie danej części sieci jedną bocznicą. Bocznicy tej przypisujemy charakterystykę zastępczą. Bardziej proste stają się wtedy dalsze analizy lub obliczenia. W pracach [72,73,74,57,125] podano metody wyznaczania charakterystyk zastępczych wymienionych części sieci oraz typowe przykłady przebiegu tych charakterystyk w zależności od rodzaju elementów tworzących daną część. Podsieć w dalszych analizach struktury sieci lub w innych zagadnieniach obliczeniowych może być traktowana jako pojedyncza bocznica.



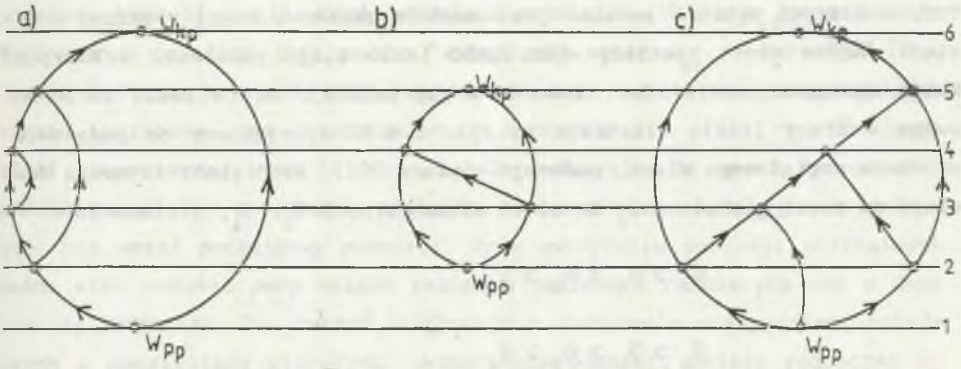
Rys. 2.6.2. Przykłady wyników pomiarów charakterystyk zastępczych $H_z(\dot{V}_z)$ otoczeń podsieci oddziałów wydobywczych

Fig. 2.6.2. Exemplary results of measurements of the substituing characteristics $H_z(V_z)$ of the environment of sub-networks of mining flats

Wydzielona z sieci podsieć (tak jak każda sieć) posiada swoją strukturę. W pracy [121] zwrócono uwagę na tzw. sieci elementarne (podsieci elementarne), które nie zawierają już podsieci. Wyróżniono trzy typy sieci elementarnych (rys. 2.6.3):

- typ I: sieć elementarna normalna,
- typ II: sieć elementarna jednoprzekątna,
- typ III: sieć elementarna wieloprzekątna.

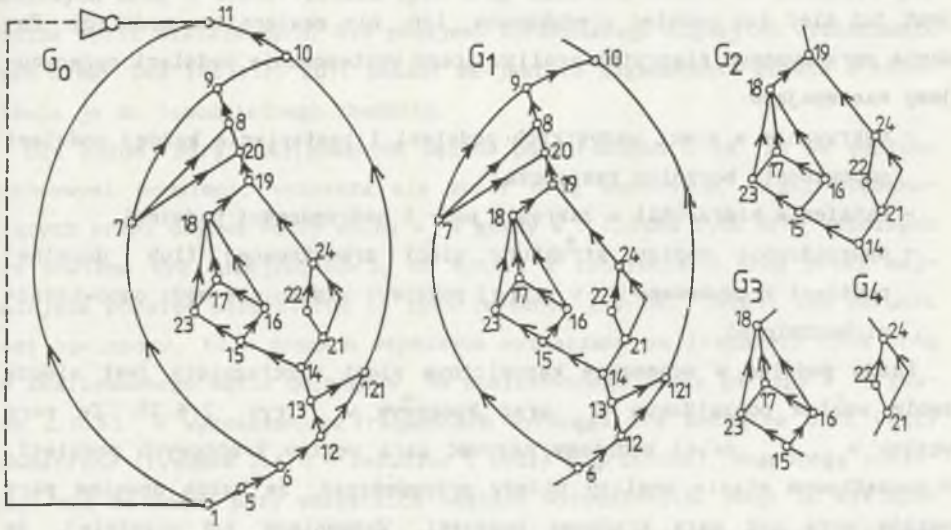
Algorytmy wykrywające w sieci podsieci powinny uwzględniać występowanie wymienionych typów podsieci. Sieci i podsieci zbudowane z podsieci elementarnych typu I ze względu na występowanie wyłącznie równoległych i szeregowych połączeń bocznic są łatwo wykrywalne przedstawionym wcześniej algorytmem redukcji połączeń równoległych i szeregowych. Przemienny ciąg zastępowania połączenia równoleglego oraz zastępowania poła-



Rys. 2.6.3. Przykłady trzech typów sieci (podsieci) elementarnych: normalnej (a), jednoprzekątnej (b), wieloprzekątnej (c)

Fig. 2.6.3. Examples of three types of elementary networks (sub-networks): normal (a), single-diagonal (b), multi-diagonal (c)

czenia szeregowego doprowadza do wyznaczenia bocznicy zastępczej reprezentującej taką podsieć w sieci zredukowanej. Algorytm ten z wiadomych względów jest nieskuteczny przy wykrywaniu podsieci elementarnych typu II i III. Typ II podsieci elementarnej jednoprzekątnej (Czeczotta) reprezentowany jest tylko przez jeden egzemplarz sieci. Podsieci elementarne typu III zawierają większą liczbę bocznic przekątnych. Sieci (podsieci) tego rodzaju jest nieskończenie wiele.



Rys. 2.6.4. Przykład hierarchicznego ciągu podsieci

Fig. 2.6.4. Example of a hierarchic sub-network sequence

W sieciach wentylacyjnych kopalń mogą wystąpić także przypadki struktur, w których wybrana podsieć jest częścią składową innej większej podsieci. Można nawet niekiedy wyodrębnić takie ciągi podsieci, w których każda następna podsieć jest zawarta w poprzedniej, na co także zwrócono uwagę w pracy [121]. Ilustruje to rys. 2.6.4, sporządzony na podstawie schematu poglądowego sieci, podanego w pracy [92]. Wyodrębnić tu można dwa ciągi od sieci globalnej G_0 do sieci elementarnych G_3, G_4, a mianowicie:

$$G_0 \supset G_1 \supset G_2 \supset G_3$$

$$G_0 \supset G_1 \supset G_2 \supset G_4$$

2.6.1. Charakterystyka metody wydzielania i redukcji podsieci

Wymienione prawidłowości w zakresie występowania w sieci podsieci mogą być wykrywane i analizowane wizualnie na podstawie graficznego obrazu struktury sieci, tzn. schematu przestrzennego lub kanonicznego. Wielkość sieci powoduje jednak, że taka analiza jest uciążliwa i czasochłonna. Na obecnym etapie wdrażania komputerowych metod analiz sieci za wskazane uznano opracowanie odpowiedniego algorytmu i programu wykrywającego występujące prawidłowości. Celowość opracowania takiego algorytmu uzasadniona jest także znacznym upraszczaniem się metod analizy następnych zagadnień struktury sieci, takich jak: przekątności bocznic, planarności i innych. Metody te stają się bardziej proste, gdy przedmiotem analizy jest już sieć lub podsieć zredukowana, tzn. nie zawierająca podsieci. Zadania opracowanego algorytmu analizującego występowanie podsieci sprecyzujemy następująco:

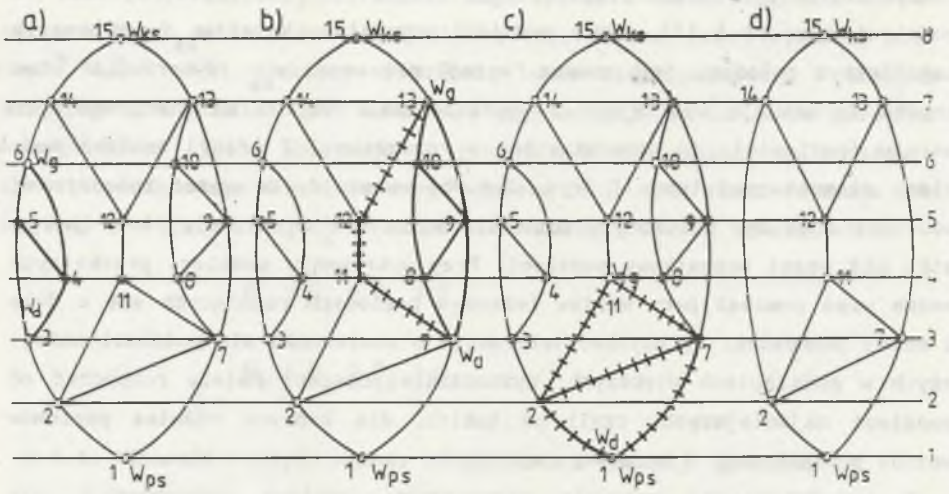
- wykrywanie w sieci wszystkich podsieci i zastąpienie każdej podsieci odpowiednią bocznicą zastępczą,
- ustalenie hierarchii w zakresie pod- i nadrzędności podsieci,
- sporządzenie zapisu struktury sieci zredukowanej (lub dowolnej podsieci zredukowanej), w której podsieci zastąpione będą odpowiednimi bocznicami.

Każda podsieć w schemacie kanonicznym sieci rozciągnięta jest między swoim węzłem początkowym w_{pp} oraz końcowym w_{kp} (rys. 2.6.3). Tę parę węzłów w_{pp}, w_{kp} dalej będziemy nazywać parą węzłów krańcowych podsieci. W początkowym etapie analizy należy przypuszczać, że każda dowolna para węzłów może być parą krańcową podsieci. Wspomniano już wcześniej, że połączenia równoległe i szeregowe bocznic występujące w podsieci są łatwo

wykrywalne w uproszczonej macierzy połączeń P'. Trudniej wykrywalne są podsieci typu II i III, czyli podsieci przekątne. Węzeł w_{kp} w schemacie kanonicznym położony jest zawsze "wyżej" niż węzeł w_{pp}. Wykorzystać więc trzeba informacje wynikające z uporządkowania węzłów do poszczególnych warstw (poziomów), co przedstawiono w rozdziale 2.2 pracy. Analiza podsieci elementarnej typu II (rys. 2.6.3b) wskazuje, że węzeł końcowy tej podsieci musi być położony w poziomie wyższym o co najmniej trzy jednostki niż węzeł początkowy podsieci. Przy wykrywaniu podsieci przekątnych można więc pominąć pary węzłów leżące w poziomach różniących się o dwie i mniej jednostek. By uzyskać informacje o zawieraniu się podsieci mniejszych w podsieciach większych, wyznaczanie podsieci należy rozpocząć od podsieci najmniejszych, czyli od takich, dla których różnica poziomów węzłów początkowego i końcowego wynosi 3.

W przedstawionej metodzie wyznaczania podsieci wykorzystuje się następującą własność wszystkich dróg przechodzących przez podsieć: jeżeli dany fragment jest podsiecią, to wszystkie drogi $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$ przechodzace przez ten fragment przechodzą przez węzeł początkowy w_{pp} i końcowy w_{kp} podsieci. Będziemy zatem poszukiwać takich par węzłów i fragmentów sieci między tymi węzłami, posiadających wymienioną własność. Liczba wszystkich dróg od węzła początkowego sieci w_{ps} do węzła końcowego w_{ks} sieci jest zazwyczaj bardzo duża. W rzeczywistych sieciach wynosi od kilku do kilkunastu tysięcy. W metodzie korzystać będziemy tylko z dróg niezależnych, tworzących (podobnie jak cykle liniowo niezależne) bazę wszystkich możliwych dróg w sieci. Liczba tych dróg bazowych wynosi ν, podobnie jak liczba cykli niezależnych. Nie podajemy opracowanego algorytmu wyznaczania tych dróg. Deo [45 str. 207] uważa, że jest to zagadnienie proste i pozostawia je do samodzielnego zbadania.

Dla każdej pary analizowanych węzłów podejrzanych o to, że są węzłami krańcowymi podsieci, wyznacza się zbiór dróg wspólnych, czyli przechodzących przez obydwa węzły dolny w_d i górny w_g. Liczba tych dróg wspólnych nie powinna być mniejsza od 3, co wynika z istnienia 3 dróg przez najmniejszą podsieć elementarną II typu (rysunek 2.6.3b). Jeżeli ten warunek jest spełniony, to w drogach wspólnych wyznaczane są fragmenty tych dróg od analizowanego węzła dolnego w_d do analizowanego węzła górnego w_g (rysunek 2.6.5). W wyznaczonych fragmentach wyróżnia się bocznice oraz węzły wewnętrzne (rysunek 2.6.5 - bocznice i węzły pogrubione). Następnie analizuje się bocznicę przy wszystkich węzłach wyróżnionych. Mogą tu wystąpić trzy charakterystyczne przypadki analizowanych fragmentów sieci pokazane na rysunku 2.6.5a,b,c.



Rys. 2.6.5. Charakterystyczne przypadki fragmentów sieci przy wyznaczaniu podsieci

Fig. 2.6.5. Characteristics of the fragments of networks while determinig a sub-network

Przypadek "a" (rys. 2.6.5.a)

Zbiór dróg przechodzących przez węzeł dolny w_d pokrywa się ze zbiorem dróg przechodzących przez węzeł górny w_g. Przy każdym węźle wyróżnionym występują tylko bocznice wyróżnione (węzły 4, 5, bocznice pogrubione). Analizowany fragment jest podsiecią, a węzły w_d i w_g są odpowiednio węzłami początkowym w_{pp} i końcowym w_{kp} podsieci. Bocznice i węzły wyróżnione wycofuje się z modelu sieci oraz wprowadza się do struktury bocznicę zastępującą podsieć, dla której węzłami krańcowymi są węzły w_{pp}, w_{kp}.

Przypadek "b" (rys. 2.6.5b)

Analizujemy kolejno wszystkie węzły wyróżnione i sprawdzamy czy wszystkie bocznice przy tych węzłach są wyróżnione. Nieprawdziwość takiego warunku dla jakiegoś węzła wyróżnionego oznacza, że przez analizowany fragment oprócz dróg wspólnych węzła dolnego w_d i górnego w_g przechodzą także drogi nie przechodzące przez któryś z tych węzłów. Likwidujemy wtedy wyróżnienie takich węzłów oraz wyróżnienie bocznic związanych z tymi węzłami (rys. 2.6.5b bocznice pogrubione z kreskami poprzecznymi przy węzłach 11 i 12). Jeżeli w dalszym ciągu przy węźle dolnym w_d i górnym w_g fragmentu liczba bocznic wyróżnionych jest większa od 1, to ponownie przeprowadzamy analizę wszystkich pozostałych węzłów wyróżnionych. Występowanie bocznic wyróżnionych przy wszystkich węzłach wyróżnionych (rys.

2.6.5b) upoważnia do stwierdzenia, że analizowany wyróżniony fragment sieci jest podsiecią. Zastąpienie tej podsieci w strukturze sieci jedną bocznicą zastępczą realizowane jest tak samo jak w punkcie a.

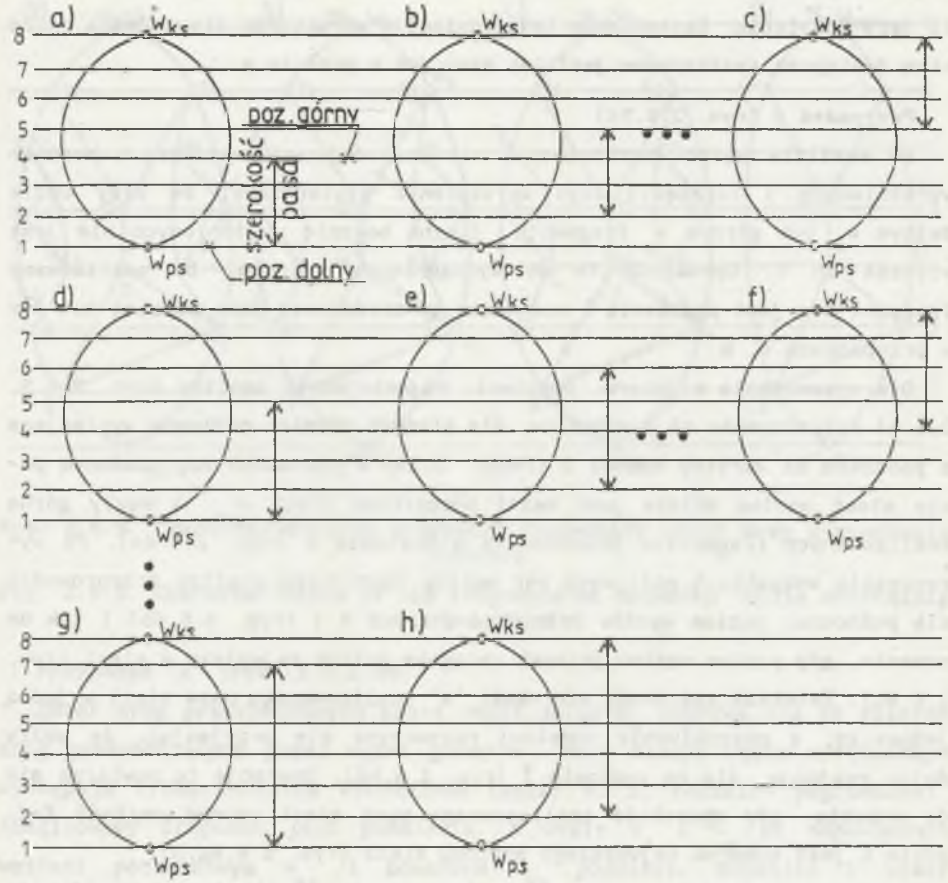
Przypadek c (rys. 2.6.5c)

Po analizie węzłów wyróżnionych nie posiadających wszystkich bocznic wyróżnionych i cofnięciu tego wyróżnienia stwierdzamy, że przy węźle dolnym w_d lub górnym w_g fragmentu liczba bocznic wyróżnionych nie jest większa od 1. Upoważnia to do wyciągnięcia wniosku, że analizowany fragment nie jest podsiecią i nie można go zredukować jako podsieć tak jak w przypadkach a, b.

Dla wyznaczenia najpierw podsieci najmniejszych analizę (rys. 2.6.5, 2.6.6) rozpoczynamy od par węzłów, dla których różnica poziomów wynikająca z podziału na warstwy wynosi 3 (rozdz. 2.2). W pierwszym analizowanym pasie sieci węzłem dolnym jest węzeł początkowy sieci w_{ps}, a węzły górne analizowanych fragmentów położone są w poziomie 4 (rys. 2.6.6a). Po wyczerpaniu wszystkich możliwych par węzłów identyczną analizę przeprowadza się podnosząc poziom węzłów dolnych i górnych o 1 (rys. 2.6.6b) i tak do momentu, gdy poziom węzłów górnych osiągnie poziom najwyższy w sieci (rys. 2.6.6c). Zwiększa się wtedy szerokość "s" analizowanego pasa sieci o jedną jednostkę, a poszukiwanie podsieci rozpoczyna się przyjmując, że węzły dolne znajdują się na poziomie 1 (rys. 2.6.6d). Operację tę powtarza się do momentu, gdy szerokość analizowanego pasa sieci uzyska wartość K-2, gdzie K jest numerem najwyższego poziomu sieci (rys. 2.6.6g,h).

Opracowany algorytm oraz program komputerowy realizujący wyszukiwanie podsieci na podstawie przedstawionej metody składa się z następujących zasadniczych bloków:

1. Redukcja połączeń szeregowych i równoległych. Operację tę przeprowadza się na początku programu oraz po zakończeniu analizy każdego pasa wtedy, gdy znaleziono podsieć. W trakcie redukcji podsieci mogą się pojawiać połączenia szeregowe i równoległe niektórych bocznic zastępczych.
2. Podział zbioru węzłów na warstwy (wg algorytmu z rozdz. 2.2).
3. Wyznaczanie i redukcja dróg niezależnych. W trakcie redukcji sieci zmniejsza się liczba bocznic i węzłów. Maleje wtedy liczba cyklomatyczna sieci, a tym samym liczba dróg niezależnych.
4. Wyznaczanie podsieci oraz koordynacja szerokości i położenia analizowanego pasa sieci.
5. Sporządzanie zbioru wynikowego, w którym zapisana jest struktura sieci zredukowanej oraz struktura wszystkich wydzielonych podsieci.



Rys. 2.6.6. Szerokość "s" i położenie analizowanego pasa fragmentu sieci przy wyznaczaniu podsieci

Fig. 2.6.6. Width "s" and position of the anlysed belt of a network fragment while determining the sub-network

Przeprowadzona opracowanym programem analiza struktury sieci wentylacyjnych kilku kopalń węgla wykazała, że w każdej z tych sieci występuje co najwyżej kilka fragmentów sieci spełniających przyjętą definicję podsieci. Wyznaczone podsieci to przeważnie oddziały wydobywcze. Czasem występują także i inne fragmenty sieci, nie będące oddziałami, a spełniające definicję podsieci. Świadczy to o słabym wyodrębnieniu strukturalnym, zwłaszcza tzw. rejonów wentylacyjnych, w których to powstają największe zagrożenia. Słabe wyodrębnienie tych rejonów może sprzyjać przenoszeniu się powstających zagrożeń do rejonów sąsiednich.

2.7. Metoda badania planarności kopalnianej sieci wentylacyjnej

2.7.1. Uwagi o dotychczasowych badaniach planarności sieci

Ważną cechą kopalnianej sieci wentylacyjnej, wynikającą z jej struktury, jest planarność. Obszerne narzędzie badawcze dotyczące tego zagadnienia wypracowane zostało w teorii grafów. Graf G nazywany jest grafem planarnym (płaskim), jeżeli można go odwzorować na płaszczyźnie w taki sposób, że krawędzie nie posiadają punktów wspólnych oprócz wierzchołków. Grafy nie posiadające tej właściwości nazywane są grafami nieplanarnymi (niepłaskimi). Z uwagi na tę cechę struktury sieci wentylacyjnej wyróżnia się więc:

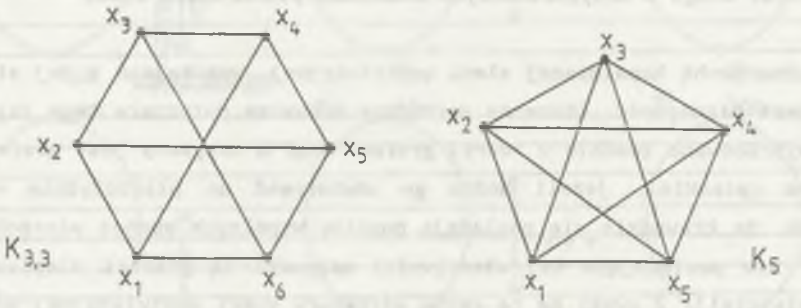
- sieci płaskie (planarne),
- sieci niepłaskie (nieplanarne).

Niepłaskość sieci wpływa nie tylko na utrudnienia w sposobach graficznego przedstawiania sieci, np. przy rysowaniu schematu kanonicznego (odwikłanie schematu [25]). Ta cecha jest istotna także przy analizie innych właściwości, takich jak na przykład przekątność bocznic w sieci. W literaturze podawane są przykłady sieci niepłaskich, w których zmiany w rozpływie powietrza, spowodowane celowymi zmianami oporów niektórych bocznic, różniły się nawet co do znaku od zmian zaplanowanych [70,14]. Występowanie tych nieoczekiwanych efektów regulacji rozpływu przypisywano nieplanarności sieci.

Zdecydowana większość sieci wentylacyjnych kopalń to sieci niepłaskie. Wynika to z prowadzenia robót górniczych w trójwymiarowej bryle obszaru górniczego. Prowadzenie eksploatacji w kilku poziomach i w wielu pokładach powoduje, że sieć prawie zawsze jest niepłaska. Wydawać się więc może, że rozstrzyganie o płaskości sieci nie jest potrzebne, skoro prawie zawsze spotykamy się z sieciami niepłaskimi. W praktyce oprócz sieci globalnych, które mogą być płaskie, występują także i to dość często podsieci, które także mogą być płaskie lub niepłaskie. Szczególne właściwości sieci lub podsieci płaskich powodują, że rozstrzyganie o planarności uważać należy za ważne zarówno w teorii sieci, jak i dla praktyki.

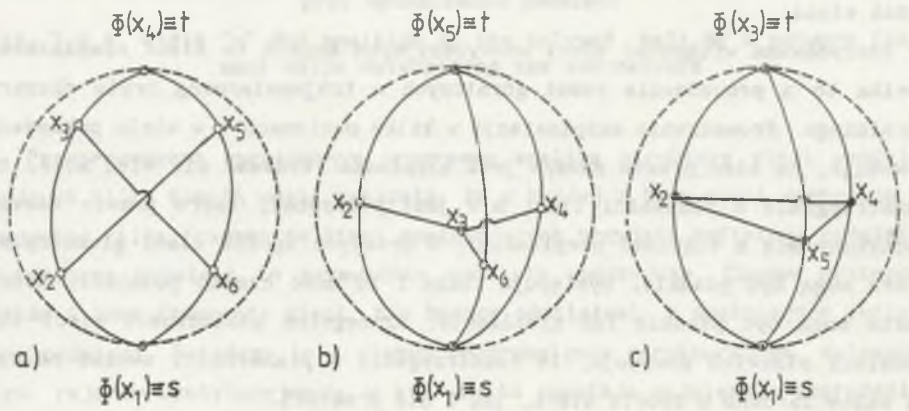
Jak już wspomniano, w zagadnieniu tym wykorzystać trzeba osiągnięcia teorii grafów, gdzie problem planarności był przedmiotem wielu prac badawczych. Przy przeglądzie literatury związanej z tą problematyką korzystano

z pozycji monograficznych [45,75,76,80,102.128,129,142]. Niektórzy autorzy tych prac w dalszym ciągu uważają, że istnieje możliwość opracowania dalszych, nowych, bardziej prostych algorytmów rozstrzygania o planarności grafów.



Rys. 2.7.1. Grafy Kuratowskiego K_{33} i K_5
Fig. 2.7.1. Kuratowski graphs K_{33} and K_5

Planarność sieci wentylacyjnych kopalń była przedmiotem analizy w pracach [120,121,126,98], gdzie nawiązano do znanego w teorii grafów kryterium Kuratowskiego rozstrzygającego o planarności grafów. Kryterium to jest następujące: graf G jest planarny wtedy i tylko wtedy, jeśli nie zawiera podgrafu homeomorficznego z grafem półpełnym K_{33} o sześciu wierzchołkach lub z grafem pełnym K_5 o pięciu wierzchołkach (rys. 2.7.1).



Rys. 2.7.2. Trzy nieplanarne sieci kryterialne: (a) S_α, (b) S_β, (c) S_γ
Fig. 2.7.2. Three non-planary criterial networks: (a) S_α, (b) S_β, (c) S_γ

Kryterium to w odniesieniu do sieci wentylacyjnych kopalń zostało zmodyfikowane [126,98]. Wyróżniono tzw. trzy elementarne sieci nieplanarne S_α, S_β, S_γ, (rys. 2.7.2). Stosowanie kryterium zmodyfikowanego do badania planarności sieci wentylacyjnych polega na sprawdzaniu, czy zawierają one podsieci częściowe, które byłyby homeomorficzne z sieciami kryterialnymi S_α, S_β, S_γ. Takie badanie planarności wg opinii przytoczonej w pracy [126] jest o wiele łatwiejsze od stosowania nieprzekształconych grafów K_{33} i K_5 Kuratowskiego. Dalej wyrażony jest pogląd: "być może osiągnie się jakąś efektywną metodę konstrukcyjną testowania planarności sieci za pomocą komputera" [126].

Kryterium Kuratowskiego nie jest jedynym znanym kryterium rozstrzygania o planarności grafów. Zykow [142] uważa, że istnieje kilka takich kryteriów. Wyróżnia cztery najważniejsze i wykazuje ich równoważność w postaci zamkniętego układu twierdzeń. We wcześniejszej pracy Deo [45] wymienione są trzy klasyczne sposoby charakteryzacji grafów planarnych. Oprócz przytoczonego już kryterium Kuratowskiego jako bardzo ważne przytaczane są twierdzenia Whitney'a oraz Mac Lane'a.

Twierdzenie Whitney'a dotyczy istnienia grafu dualnego do grafu planarnego oraz odwrotnie. Deo [45] przedstawia to twierdzenie w sposób następujący: "Graf ma graf dualny wtedy i tylko wtedy, gdy jest planarny". Twierdzenie to na gruncie teorii kopalnianej sieci wentylacyjnej zostało wykorzystane w pracy [124] do ilustracji sposobu redukowania sieci normalnych, interpretowanego jako ciąg dualnych przekształceń tej sieci z likwidacją półwęzłów.

Twierdzenie Mac Lane'a rozstrzygające o planarności grafów sformułowane jest także jako warunek konieczny i wystarczający. Deo [45] przedstawia to twierdzenie w sposób następujący: "Graf jest planarny wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje taki pełny zbiór obwodów bazowych, że żadna krawędź nie pojawia się więcej niż w dwóch z tych obwodów". Twierdzenie to wykorzystywane jest często przy wyznaczaniu obwodów (oczek) niezależnych (bazowych), potrzebnych przy układaniu równań niezależnych, wynikających z II prawa Kirchhoffa dla sieci płaskiej wtedy, gdy znana jest graficzna reprezentacja tej sieci podana w postaci schematu płaskiego.

Kulikowski [80] wyraża opinię, że klasyczne kryteria planarności lub nieplanarności grafów posiadają głównie znaczenie teoretyczne. Dla potrzeb praktyki ze względu na wielkość grafów konieczne jest opracowanie odpowiednich algorytmów rozstrzygających o planarności lub umożliwiających określenie miary nieplanarności. Przeprowadzając analizę dotychczas istniejących algorytmów, Kulikowski zalicza je do kilku podstawowych typów.

Do pierwszego typu algorytmów zalicza te, które są oparte na analizie właściwości macierzy charakterystycznych grafów, np. macierzy cykli lub przekrojów grafu. Wskazuje, że algorytmy te narzucają dość silne ograniczenia na wielkość grafu ze względu na konieczność przechowywania w pamięci operacyjnej komputera obszernych zapisów macierzy binarnych i wykonywania na nich działań algebraicznych i logicznych.

Do drugiej grupy algorytmów zalicza te, które wykorzystują szczególne właściwości niektórych cykli w grafach, np. cyklu Hamiltona lub cyklu maksymalnego. W algorytmach tych po wyznaczeniu tego szczególnego cyklu dołącza się do niego łańcuchy będące cięciwami względem tego cyklu i analizuje się spełnianie wymogów grafów planarnych.

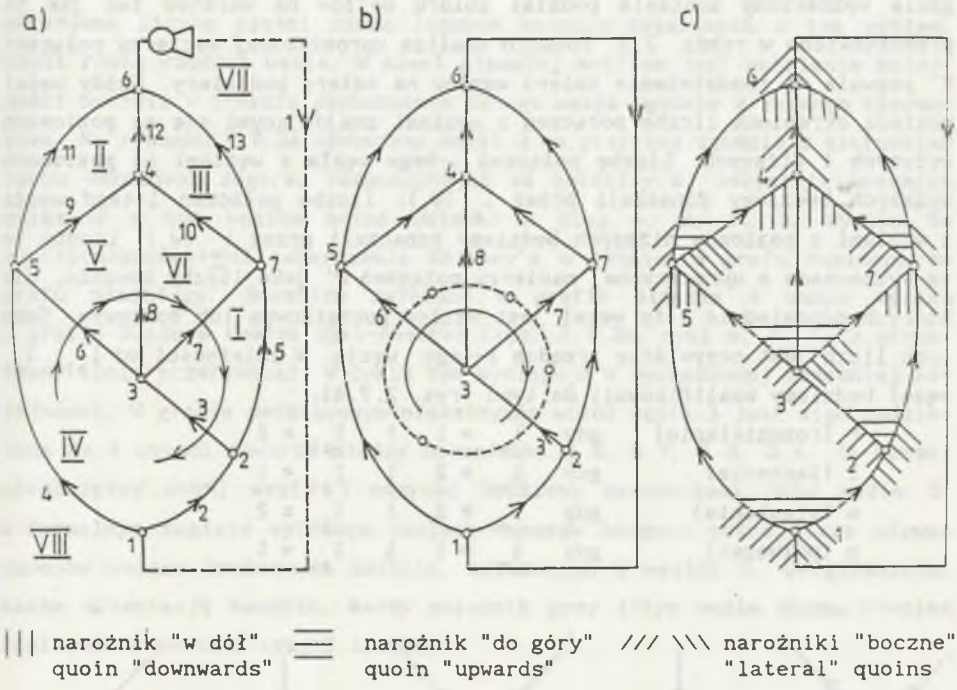
Do trzeciej grupy algorytmów w pracy [80] zaliczane są algorytmy oparte na idei rozwijania grafu. Rozwijanie to rozpoczyna się od pewnego planarnego podgrafu prostego. Następnie uzupełnia się ten podgraf dołączając łańcuchy lub cykle tak, by nie naruszyć planarności. Dąży się do uzyskania całego badanego grafu. W trakcie rozwijania grafu nieplanarnego napotyka się na etapy krytyczne, w których rozwinięcie planarne staje się niemożliwe. Analiza tych przypadków przynosi pożądaną charakterystykę nieplanarności danego grafu.

W trakcie badań struktury sieci w niniejszej pracy zwrócono uwagę na możliwość opracowania innego sposobu rozstrzygania o planarności sieci. W sposobie tym korzystać się będzie z osiągalności określonej na zbiorze węzłów (rozdz. 2.4), a rozwijanie grafu realizowane będzie nie z jednego miejsca, lecz z wielu możliwych podgrafów spełniających warunki sprecyzowane w następnych rozdziałach pracy. Dążyć się będzie do sprawdzenia, czy graf spełnia kryterium Mac Lane'a.

2.7.2. Wybrane właściwości strukturalne elementów acyklicznej sieci płaskiej zredukowanej

Graf planarny można odwzorować na płaszczyźnie bez pozornego przecinania się bocznic. Płaszczyzna zostaje wtedy podzielona na $\nu + 1$ części (rysunek 2.7.3a), gdzie ν jest tzw. liczbą cyklomatyczną określoną dla grafów spójnych w sposób następujący: $\nu = m - n + 1$. Liczby m oraz n są równe liczebności odpowiednio zbioru bocznic i zbioru węzłów. Wspomniane części płaszczyzny zwane są także regionami, a otaczające je krawędzie granicami regionów. Wyróżnia się regiony wewnętrzne, których liczba wynosi ν oraz jeden region zewnętrzny otaczający graf z zewnątrz. W pracy [124]

granice regionów nazywane są cyklami-komórkami. W schemacie na rysunku 2.7.3a występuje 7 niezależnych regionów wewnętrznych (I, II, III, IV, V, VI, VII) oraz jeden zależny region zewnętrzny VIII.



Rys. 2.7.3. Regiony (cykle-komórki I,II,...,VIII) i narożniki w sieci zredukowanej płaskiej

Fig. 2.7.3. Regions (cell-cycles I,II,...,VIII) and quoins in a reduced flat network

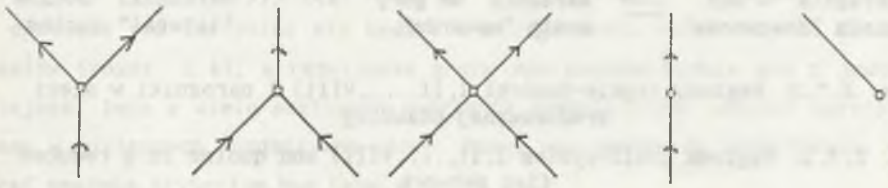
Twierdenie Mac Lane'a może być także sformułowane w sposób następujący [80]: "Warunkiem koniecznym i wystarczającym do tego, by graf był planarny, jest możliwość określenia w grafie bazy niezależnych liniowo cykli oraz pewnego dodatkowego cyklu liniowo zależnego od pozostałych w taki sposób, by każda krawędź grafu występowała dokładnie w dwu tak wyznaczonych cyklach". W proponowanej dalej metodzie badania planarności sieci dążyć będziemy do sprawdzenia, czy istnieje taki wyżej wymieniony zbiór cykli niezależnych.

Wpierw jednak przedstawimy niektóre dalsze właściwości struktury sieci płaskiej zredukowanej. W dalszych rozważaniach zakładać będziemy, że przedmiotem analizy będzie właśnie sieć zredukowana (tzn. nie zawierająca podsieci). Przyjęcie tego założenia ułatwia badanie planarności, a nie na-

rusza ogólności proponowanej metody, ponieważ każda podsieć zredukowana może być przeanalizowana oddzielnie. Zakładać także będziemy, że sieć jest acykliczna w sensie dróg.

W pierwszej kolejności struktura sieci zostanie poddana uporządkowaniu, gdzie wyznaczony zostanie podział zbioru węzłów na warstwy tak jak to przedstawiono w rozdz. 2.2. Ponadto analiza uproszczonej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$ pozwala na rozdzielenie zbioru węzłów na cztery podzbiory. Każdy węzeł posiada określoną liczbę połączeń z węzłami znajdującymi się na poziomach wyższych i niższych. Liczbę połączeń i-tego węzła z węzłami na poziomach wyższych będziemy oznaczali przez $l_{pl}(w_i)$; liczbę połączeń i-tego węzła z węzłami z poziomów niższych będziemy oznaczali przez $l_{ml}(w_i)$. Liczby te są wyznaczane z uproszczonej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$ jako liczby bocznic, dla których odpowiednio i-ty węzeł jest węzłem początkowym lub końcowym. Suma tych liczb jest oczywiście rzędem i-tego węzła. W zależności od l_{pl}, l_{ml} węzeł będziemy kwalifikowali do typu (rys. 2.7.4):

r (rozdzielanie)	gdy	$l_{ml} = 1$	i	$l_{pl} \geq 2$
ł (łączenie)	gdy	$l_{ml} \geq 2$	i	$l_{pl} = 1$
m (mieszanie)	gdy	$l_{ml} \geq 2$	i	$l_{pl} \geq 2$
p (półwęzeł)	gdy	$l_{ml} = 1$	i	$l_{pl} = 1$



rozdzielanie separation | łączenie joining | mieszanie mixing | półwęzeł semi-node | węzeł wiszący hanging node

Rys. 2.7.4. Typy węzłów w kopalnianej sieci wentylacyjnej

Fig. 2.7.4. Types of nodes in mine ventilation networks

Podział ten dla stanu początkowego struktury sieci niezredukowanej wyczerpuje wszystkie możliwości. W sieci zredukowanej półwęzły nie występują z wyjątkiem węzła początkowego w_{ps} lub końcowego sieci w_{ks}, które niekiedy mogą być półwęzłami. W trakcie analizy planarności sieci mogą także wystąpić przypadki pojawienia się węzła wiszącego, posiadającego połączenie tylko z jednym innym węzłem. Zachodzi wtedy następująca równość $l_{pl} + l_{ml} = 1$.

W sieci płaskiej przydatne jest także posługiwanie się "narożnikami". Każdy węzeł poprzez bocznice związany jest z węzłami sąsiednimi. W przypadku gdy graf płaski jest już narysowany, widać wyraźnie, że bocznice związane z danym węzłem dzielą płaszczyznę wokół tego węzła na określoną liczbę części równą liczbie bocznic związanych z tym węzłem, czyli równą rzędowi węzła. W sieci płaskiej możliwe jest ustalenie kolejności bocznic w trakcie obchodzenia danego węzła zgodnie z zadanym kierunkiem. Na rysunku 2.7.3a obchodząc węzeł 3 na przykład zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, rozpoczynając od bocznicy 6, wszystkie bocznice związane z tym węzłem można ustawić w ciąg 6, 8, 7, 3. Wynika to z przytoczonego już twierdzenia Whitney'a o istnieniu grafu dualnego do grafu płaskiego. Bocznice związane w grafie płaskim z danym węzłem w grafie dualnym tworzą cykl-komórkę (rys. 2.7.3b, cykl 6, 8, 7, 3 zaznaczony linią przerywaną). W cyklu tym występują w wyznaczonej wcześniej kolejności. W grafie podstawowym płaszczyzna wokół węzła 3 jest więc podzielona na 4 części zawarte między bocznicami 6 8, 8 7, 7 3, 3 6. Te części płaszczyzny wokół węzła 3 nazywać będziemy narożnikami przy węźle 3. W formalnym zapisie cyfrowym zamiast numerów bocznic można także używać numerów węzłów krańcowych bocznic, związanych z węzłem 3. Uwzględniając także orientację bocznic, każdy narożnik przy i-tym węźle można również zapisywać w postaci trójki liczb:

$$i:(\pm j,\pm k), \qquad (2.7.2.1)$$

przy czym: i - numer węzła, wokół którego zapisujemy narożnik,
j, k - numery węzłów krańcowych bocznic tworzących narożnik wokół i-tego węzła.

Znaki "±" wynikają z nadanej orientacji bocznic zapisanej np. w macierzy połączeń $\mathbb{P}'$:

znak "+" dotyczy orientacji od węzła i-tego do węzła j-tego lub k-tego,
znak "-" dotyczy orientacji od węzła j-tego lub k-tego do węzła i-tego.

Analiza znaków przy węzłach j, k w zapisie narożnika i-tego węzła pozwala na wyróżnienie trzech typów narożników, a mianowicie:

- "narożnik do góry", gdy znaki przy j oraz k są dodatnie; przy węźle 3 (rys. 2.7.3c) występują dwa takie narożniki 3:(5,4), 3:(4,7),
- "narożnik w dół", gdy znaki przy j oraz k są ujemne; przy węźle 3 nie występuje taki narożnik, przy węźle 5 występuje jeden taki narożnik 5:(-3,-1),
- "narożnik boczny", gdy znaki przy j oraz k są różne; przy węźle 3 występują dwa takie narożniki 3:(-2,5), 3:(-2,7).

W każdej sieci płaskiej z bocznicą zamykającą liczba wszystkich narożników jest równa sumie rzędów węzłów, a tym samym podwojonej liczbie bocznic 2m. Liczby narożników "do góry" i "w dół" są jednakowe i wynoszą $m - n = \nu - 1$. Przy każdym węźle liczba narożników "do góry" jest równa $l_{pl} - 1$, liczba narożników "w dół" jest równa $l_{mi} - 1$. Liczba narożników bocznych w sieci płaskiej jest równa podwojonej liczbie węzłów 2n, ponieważ przy każdym węźle występują dwa narożniki boczne, co jest ważną właściwością sieci płaskiej. Ilustruje to schemat kanoniczny sieci płaskiej (rys. 2.7.3c), w której występuje m = 13 bocznic, n = 7 węzłów. Liczba cyklomatyczna wynosi $\nu = 7$. Odpowiednie liczby narożników są następujące:

- narożników "do góry" 13 - 7 = 6
- narożników "w dół" 6
- narożników "bocznych" 2·7 = 14

Wymieniona identyfikacja narożników przy węzłach jest oczywista, gdy posiadamy narysowany schemat kanoniczny sieci płaskiej zorientowanej w sposób acykliczny. W zapisie cyfrowym takich informacji a priori nie posiadamy. W trakcie rozpoznawania struktury sieci i wyznaczania liniowo niezależnych cykli-komórek gromadzone informacje o wyznaczonych narożnikach będą przydatne przy rozstrzyganiu o planarności sieci. Pośrednio korzystać więc będziemy w tym zagadnieniu także z kryterium Whitney'a.

2.7.3. Charakterystyka metody wyznaczania cykli-komórek i badania planarności sieci z wykorzystaniem osiągalności zwyczajnej

Na schemacie kanonicznym sieci płaskiej zorientowanej w sposób acykliczny po uporządkowaniu zbioru węzłów w warstwy wyraźnie widać, że każdy cykl-komórka (z wyjątkiem cykli, w których występuje bocznica zamykająca) posiada swój węzeł dolny w_{dk} oraz górny w_{gk} (rysunek 2.7.3a, regiony I,...,VI). Między tymi węzłami występują co najmniej dwie drogi $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$. Jeżeli poprawnie wyznaczymy dwie drogi od węzła dolnego w_{dk} do węzła górnego w_{gk}, będące granicą danej komórki, to po ich złożeniu uzyska się poszukiwany, elementarny cykl-komórkę, wynikający z danego regionu płaszczyzny.

Najpierw trzeba jednak skojarzyć węzeł dolny w_{dk} oraz górny w_{gk} każdej komórki. Gdy dysponujemy już narysowanym schematem kanonicznym płaskim, czynność ta nie sprawia żadnych trudności. Pamiętamy jednak, że a priori nie znamy schematu kanonicznego, a także nie wiemy czy sieć jest płaska. W przedstawionej metodzie wychodząc od znanego zapisu cyfrowego struktury

sieci, podanego np. w postaci uproszczonej macierzy połączeń P', mamy dopiero rozstrzygnąć o planarności sieci.

Węzłami dolnymi w_{dk} komórek są węzły typu "r" (rozdzielanie), a narożniki "do góry" przy tych węzłach są dolnymi fragmentami każdej komórki (rys. 2.7.3a). Węzłami górnymi w_{gk} komórek są węzły typu "ł" (łączenie), a narożniki "w dół" przy tych węzłach są górnymi fragmentami każdej komórki. Węzeł typu "m" (mieszanie) jest węzłem dolnym i górnym conajmniej dwu różnych komórek. Narożniki boczne są fragmentami wspomnianych dróg od w_{dk} do w_{gk}. Przy kojarzeniu par węzłów dolnego w_{dk} i górnego w_{gk} komórek korzystać będziemy z przedstawionej w rozdz. 2.4 osiągalności określonej na iloczynie kartezjańskim zbioru węzłów. Do wyznaczania cykli-komórek stosować będziemy cztery różne sposoby wynikające z konfiguracji komórek w sieci oraz z osiągalności $osg(w_{dk},w_{gk})$. Dwa z tych sposobów występują najczęściej, dlatego też omówione zostaną w pierwszej kolejności. Dwa pozostałe przedstawimy w dalszej części rozdziału.

Pierwszy sposób wyznaczania cykli-komórek

Zauważyć trzeba, że gdy $osg(w_i,w_j) = 2$ oraz istniejące dwie drogi $w_i \rightarrow w_j$ z wyjątkiem węzłów początkowego w_i oraz końcowego w_j nie posiadają innych elementów wspólnych, to węzły w_i, w_j są odpowiednio węzłami dolnym w_{dk} i górnym w_{gk} komórki. Z wyznaczonych dróg poprzez odwrócenie jednej z nich i dołączenie do drugiej utworzyć można cykl elementarny wynikający z tej komórki. W schemacie na rys. 2.7.3a osiągalność z węzła 1 do węzła 5 wynosi 2. Wyznaczone dwie drogi: 1 2 3 5, 1 5 z wyjątkiem węzłów 1 i 5 nie posiadają żadnych innych węzłów wspólnych. Cykl związany z tą komórką ma postać 1 2 3 5 -1. W zapisie dróg i cykli używać będziemy numerów węzłów. W sieci zredukowanej ze względu na niewystępowanie połączeń równoległych taki zapis jest jednoznaczny.

Drugi sposób wyznaczania cykli-komórek

Wymienione spostrzeżenie można także rozszerzyć na przypadek, gdy $osg(w_i,w_j) = 3$, występuje bocznica o węzłach początkowym i końcowym w_i, w_j oraz gdy pozostałe dwie drogi $w_i \rightarrow w_j$ oprócz węzłów w_i, w_j nie posiadają żadnych innych węzłów wspólnych. Wtedy to węzły w_i, w_j są węzłami odpowiednio dolnym w_{dk} oraz górnym w_{gk} dwu przylegających do siebie komórek. Dwa cykle utworzone każdy z jednej drogi $w_i \rightarrow w_j$ oraz z bocznicy w_i w_j są związane z analizowanymi komórkami, czyli są elementarnymi. W sieci na rys. 2.7.3a osiągalność od węzła 3 do 4 wynosi 3. Istnieje bocznica 3 4

oraz dwie drogi 3 5 4, 3 7 4. Cykle-komórki mogą być utworzone w sposób następujący: 3 5 4 -3, 3 4 -7 -3.

Przedstawione sposoby wyznaczania cykli-komórek, w których przy kojarzeniu par węzłów dolnego w_{dk} i górnego w_{gk} komórki korzysta się z osiągalności 2 lub 3 (w przypadku, gdy istnieje bocznica w_{dk} w_{gk} oraz dwie rozłączne drogi $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$), nazywać będziemy dalej sposobami z osiągalnością zwykłą. W metodzie będzie zachodziła także konieczność korzystania z osiągalności większej niż 2. Przypadki takie dalej nazywać będziemy przypadkami specjalnymi. Zagadnienie to omówione będzie w dalszej części rozdziału.

W metodzie sprawdzania planarności sieci, po procedurze podziału zbioru węzłów na warstwy (rozdz. 2.2), wyznaczana jest osiągalność (rozdz. 2.4). Następnie przedstawionymi sposobami wyznaczane są cykle-komórki oparte na parach węzłów, dla których osiągalność jest równa 2 lub 3 (osiągalność zwykła). Wyznaczanie takich cykli realizowane jest w odpowiednim porządku, wynikającym z różnicy r_p poziomów węzłów górnego w_g i dolnego w_d:

$$r_p = poz(w_g) - poz(w_d)$$

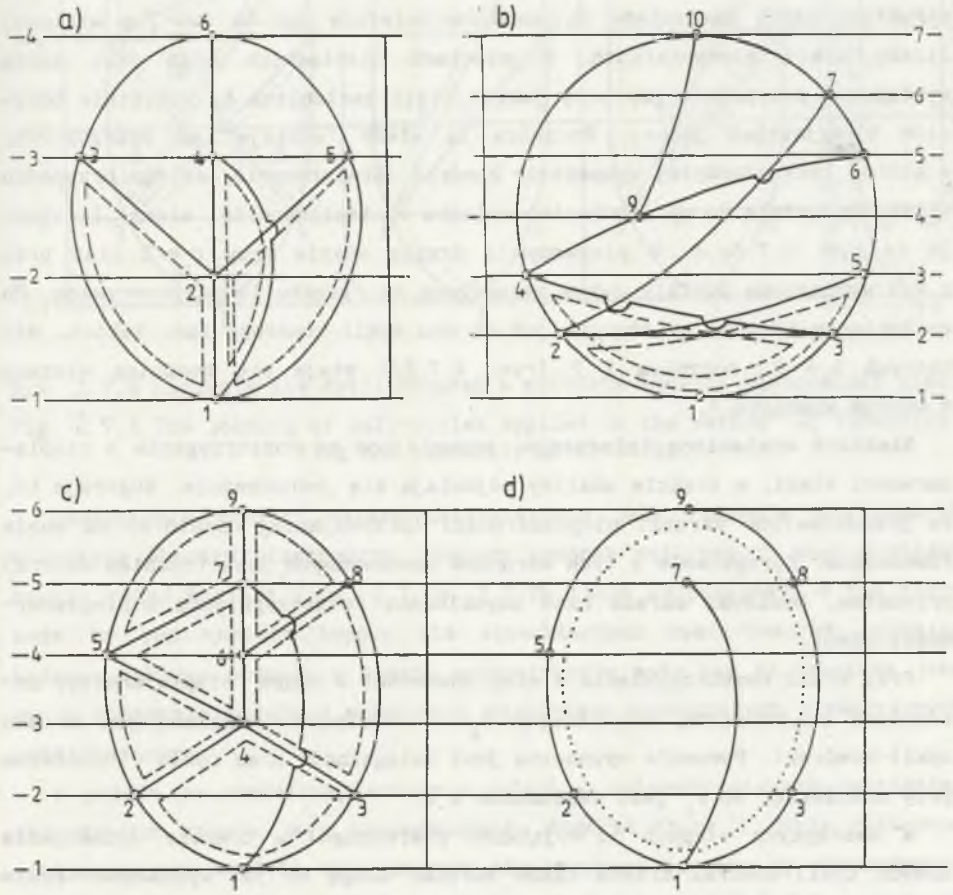
Analizę rozpoczyna się od $r_p = 2$, czyli od komórek najkrótszych. Po wyznaczeniu każdego cyklu-komórki zwiększany jest wskaźnik b_k przy wszystkich bocznicach należących do tego cyklu. Wskaźnik ten świadczy o liczbie cykli elementarnych, do których należy już dana bocznica. Przy $b_k \geq 2$ bocznica jest zasłaniana w strukturze sieci. Z wyznaczonego cyklu elementarnego można także wyodrębnić i zapamiętać narożniki występujące w tym cyklu.

Po wyczerpaniu wszystkich możliwych par węzłów, dla których osiągalność wynosi 2 lub 3 oraz $r_p = 2$, przeprowadza się analizę dotychczas uzyskanych informacji z wyznaczonych cykli elementarnych, analizę zredukowanej uproszczonej macierzy połączeń $\mathbb{P}'$ i tabeli narożników. Analiza ta wykonywana także w każdym następnym etapie algorytmu polega na sprawdzeniu następujących parametrów i warunków umożliwiających stwierdzenie nieplanarności sieci:

- liczby b_k każdej bocznicy. Zaistnienie $b_k > 2$ oznacza, że bocznica została już zaliczona do więcej niż dwu elementarnych cykkli-komórek, co w sieci płaskiej nie jest możliwe. Stąd wyciąga się wniosek o nieplanarności sieci. Ilustruje to przykład na rys. 2.7.5a, gdzie przy $r_p = 2$ dla par węzłów (1,3), (1,4), (1,5) stwierdzono między węzłem dolnym 1 i węzłami górnymi 3, 4, 5 osiągalność równą 2. Wyznaczone cykle elementarne (linie przerywane na schemacie rys. 2.7.5a) są następujące: 1 2 3 -1,

1 2 4 -1, 1 2 5 -1. Bocznica 1 2 występuje we wszystkich trzech cyklach ($b_k = 3$), co przeczy planarności sieci;

- liczby wykorzystanych narożników "do góry" przy każdym węźle. Liczba ta w sieci płaskiej w żadnym etapie analizy nie może być większa od $l_{pl} - 1$. Niespełnienie tego warunku oznacza, że dany węzeł jest węzłem dolnym w_d kilku cykli, których liczba przekracza $l_{pl} - 1$, co w sieci płaskiej jest niemożliwe. Ilustruje to przykład na rys. 2.7.5b. W pierwszym etapie przy $r_p = 2$ osiągalność równa 2 zachodzi dla par węzłów 1 4 oraz 1 5. Wyznaczone dwa cykle są następujące: 1 3 4 -2 -1, 1 2 5 -3 -1 (rys. 2.7.5b linie przerywane). Narożnik 1:(2,3) występuje w obydwu cyklach. Został wykorzystany dwa razy, co jest sprzeczne z właściwościami sieci płaskiej,



Rys. 2.7.5. Przykłady schematów ilustrujące warunki rozstrzygania o nieplanarności sieci

Fig. 2.7.5. Example of diagrams illustrating the conditions of determinig the non-planarity of a network

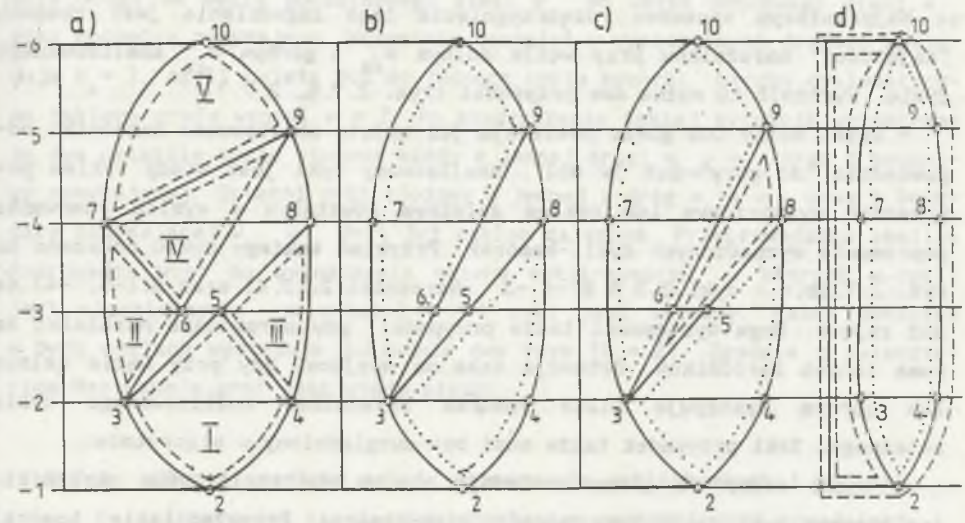
- liczby wykorzystanych narożników "w dół" przy każdym węźle. Podobnie jak wyżej liczba ta w sieci płaskiej w każdym etapie analizy nie może być większa od l_{mi} - 1. Niespełnienie tego warunku oznacza, że dany węzeł jest węzłem górnym w_g kilku cykli, których liczba przekracza l_{mi} - 1, co w sieci płaskiej nie jest możliwe;
- liczby narożników bocznych przy każdym węźle. Liczba ta w sieci płaskiej w każdym etapie analizy nie jest większa od 2. Niespełnienie tego warunku upoważnia do stwierdzenia nieplanarności sieci. Na rys. 2.7.5a w pierwszym etapie analizy w trzech wyznaczonych cyklach elementarnych przy węźle 2 występują trzy narożniki boczne: 2:(-1,3), 2:(-1,4), 2:(-1,5), co przeczy planarności sieci;
- występowania bocznic i węzłów wiszących. W trakcie wykonywanej analizy struktury sieci zasłaniane są bocznice należące już do dwu lub większej liczby cykli elementarnych. W sieciach niepłaskich mogą więc także występować przypadki, gdy przy jakimś węźle zasłonięte są wszystkie bocznice z wyjątkiem jednej. Bocznica ta wtedy "odstaje" od płaszczyzny, w której leżą wcześniej wyznaczone komórki. Stwierdzenie takiego przypadku także upoważnia do wyciągnięcia wniosku o nieplanarności sieci. Ilustruje to rys. 2.7.5c,d. W pierwszym i drugim etapie przy $r_p = 2$ oraz przy $r_p = 3$ wyznaczone zostały cykle zaznaczone na rysunku linią przerywaną. Po zasłonięciu bocznic należących już do dwu cykli-komórek, tzn. takich, dla których $b_k = 2$, bocznica 1 7 (rys. 2.7.5d) staje się bocznicą wiszącą z węzłem wiszącym 7.

Niektóre wymienione informacje, pozwalające na rozstrzyganie o nieplanarności sieci, w trakcie analizy pojawiają się jednocześnie. Sugeruje to, że przedstawione warunki nieplanarności (przynajmniej niektóre) są sobie równoważne. Korzystanie z tych warunków równoważnych jest (zdaniem autora) przydatne, ponieważ skraca czas uzyskiwania rozstrzygnięcia o nieplanarności sieci.

Przy braku rozstrzygnięcia o nieplanarności w danym etapie analizy zasłaniane są bocznice, dla których $b_k = 2$ (bocznice te należą już do dwu cykli-komórek). Ponownie wyznaczna jest osiągalność oraz cykle elementarne przy założeniu, że r_p jest zwiększone o 1.

W następnych etapach (z wyjątkiem pierwszego) w trakcie wyznaczania nowych cykli-komórek trzeba także zwracać uwagę na już wyznaczone cykle elementarne oraz na pojawianie się komórek zastępczych powstających po zasłonięciu bocznic, dla których $b_k = 2$. Ilustrują to rysunki 2.7.6, 2.7.7. W pierwszym etapie analizy przy $r_p = 2$ wyznaczono (rys. 2.7.6a) 5 cykli-komórek, które na rysunku umownie oznaczono cyframi I, II, III, IV, V (li-

nie przerywane w komórkach). Nie był spełniony żaden z warunków rozstrzygających o nieplanarności. Trzy bocznice o węzłach krańcowych 4 5, 6 7, 7 9 należą już każda do dwu cykli-komórek. Jeżeli sieć ma być płaska, to zgodnie z twierdzeniem Mac Lane'a, bocznice te nie powinny należeć do następnych cykli komórek. Po zasłonięciu tych bocznic powstaje graf-schemat uproszczony pokazany na rys. 2.7.6b.



Rys. 2.7.6 Łączenie się cykli-komórek w metodzie badania planarności sieci

Fig. 2.7.6 The joining of cell-cycles applied in the method of investigating the planarity of networks

Zasłanianie bocznic należy interpretować jako łączenie się komórek w większe obszary płaszczyzny. Obszary komórek połączonych mogą posiadać bardzo różny kształt (rys. 2.7.6b, 2.7.7b linie kropkowane), w tym także może to być kształt typowy dla elementarnych cykli-komórek. Granica każdego takiego obszaru w sensie matematycznym może być utożsamiana jako wynik dodawania modulo 2 wszystkich dotychczas wyznaczonych elementarnych cykli-komórek.

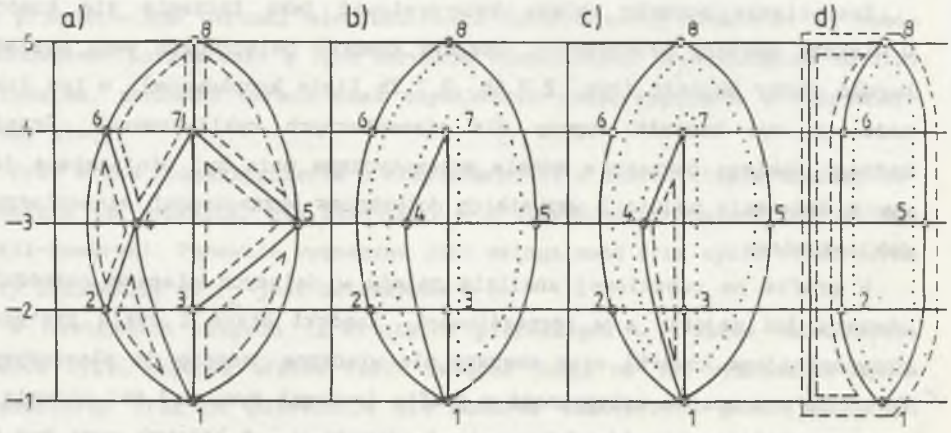
W grafie po częściowej analizie należy w dalszych etapach rozróżniać obszary już zajęte, a w szczególności komórki stare i cykle zastępcze przypominające komórki oraz obszary nie włączone jeszcze do płaszczyzny. Ponownie wyznaczona osiągalność w grafie (schemat rys. 2.7.6b) pozwala na sprecyzowanie par węzłów dolnego w_d i górnego w_g, z których mogą być wyznaczone następne cykle-komórki. Dla każdej takiej pary węzłów w_{dk}, w_{gk} tworzone są drogi $w_d \rightarrow w_g$. Jeżeli przynajmniej jedna bocznica w tych dwu

drogach posiada $b_k = 0$, to tworzony jest nowy cykl-komórka (rys. 2.7.6b,c, cykl 3 5 8 9 -6 -3). W sytuacji gdy w wyznaczonym cyklu wszystkie bocznice posiadają $b_k = 1$ (rys. 2.7.7b,c), rozstrzygnąć trzeba:

- czy cykl ten jest cyklem-komórką poprzednio wyznaczonym,
- czy jest cyklem zastępczym powstałym z sumowania poprzednio wyznaczonych cykli-komórek,
- czy jest nowym cyklem-komórką?

Najprostszym sposobem rozstrzygnięcia tego zagadnienia jest zbadanie "zajętości" narożników przy węźle dolnym w_{dk} i górnym w_{gk} analizowanego cyklu. Wyróżnić tu można dwa przypadki (rys. 2.7.6, 2.7.7):

- węzeł dolny lub górny posiadają już zajęte analizowane narożniki odpowiednio "do góry" lub "w dół". Analizowany cykl jest wtedy cyklem poprzednio wyznaczonym lub cyklem zależnym powstałym w wyniku sumowania poprzednio wyznaczonych cykli-komórek. Przykład takiego cyklu pokazano na rys. 2.7.6b,c - cykl 2 3 5 8 -4 -2. Narożniki 2:(3,4) oraz 8:(-5, -4) są już zajęte. Mogą występować także przypadki, gdy sprawdzane narożniki są sumą innych narożników. Sytuacja taka ma miejsce, gdy przy węźle dolnym lub górnym występuje kilka komórek składników analizowanego cyklu zależnego. Taki przypadek także musi być uwzględniony w algorytmie;
- węzeł dolny i górny posiadają nie zajęte analizowane narożniki. Analizowany cykl jest wtedy nowym cyklem-komórką. Przykład takiej komórki pokazano na rys. 2.7.7b - cykl 1 4 7 -3 -1. Przy węźle dolnym i górnym odpowiednie narożniki 1:(4,3), 7:(-4,-3) nie są zajęte. Wymieniony cykl jest cyklem elementarnym (rys. 2.7.7b,c).



Rys. 2.7.7. Łączenie się cykli-komórek w metodzie badania planarności sieci

Fig. 2.7.7. The joining of cell-cycles applied in the method of investigating the planarity of networks

Na rys. 2.7.7c powstały więc następne bocznice posiadające $b_k = 2$. Istnieje więc możliwość dalszej redukcji analizowanych schematów (rys. 2.7.7d). Powtarzanie wymienionych etapów analizy w większości sieci płaskich zredukowanych doprowadza do sytuacji pokazanej na rysunkach 2.7.6d, 2.7.7d. (Przypadki nie doprowadzające do takiej redukcji grafu zostaną omówione w dalszej części rozdziału). Cała wewnętrzna część schematu została przyporządkowana do jednej płaszczyzny, a pozostały tylko dwie drogi od węzła początkowego sieci w_{ps} do węzła końcowego sieci w_{ks} oraz bocznica zamykająca. Wszystkie bocznice w wymienionych drogach posiadają $b_k = 1$, czyli należą już do jednego cyklu komórki. Liczba cyklomatyczna takiego grafu wynosi $\nu = 2$. Po stwierdzeniu takiej sytuacji wyznaczane są dwa ostatnie cykle złożone każdy z jednej drogi $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$ oraz z bocznicy zamykającej. Ostatni cykl złożony z jednej z dróg $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$ oraz z bocznicy zamykającej $w_{ks}\ w_{ps}$ jest już cyklem zależnym. Przeprowadzona analiza doprowadza więc do wyznaczenia zbioru cykli-komórek, w których ν cykli jest niezależnych, a ostatni $\nu + 1$ cykl jest zależny. Każda bocznica w tych cyklach występuje dokładnie dwa razy ($b_k = 2$). Zgodnie z twierdzeniem Mac Lane'a graf jest wtedy płaski.

2.7.4. Charakterystyka metody wyznaczania cykli-komórek i badania planarności sieci z wykorzystaniem osiągalności specjalnej

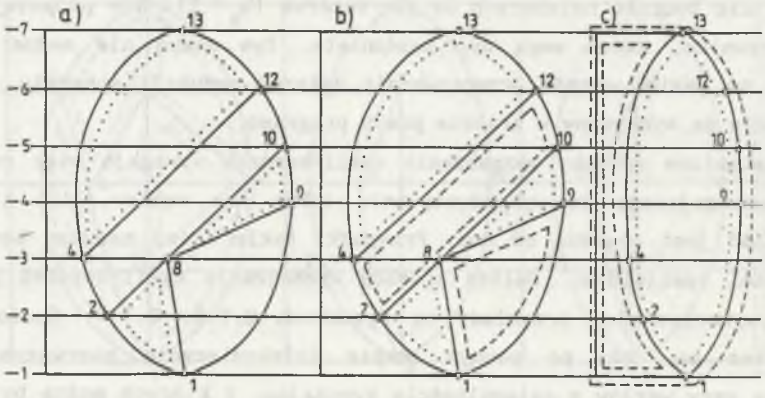
W poprzednim rozdziale wspomniano, że w trakcie analizy planarności sieci, kiedy to przy kojarzeniu par węzłów dolnego w_{dk} i górnego w_{gk} komórek wykorzystuje się osiągalność zwyczajną 2 lub 3 (pierwszy i drugi sposób wyznaczania cykli-komórek), mogą wystąpić przypadki, w których nie uzyskuje się bocznic należących do dwu komórek ($b_k < 2$). Nie pojawiają się wtedy bocznice, które mogą być zasłonięte. Tym samym nie można przynajmniej na jakimś etapie przeprowadzić dalszej redukcji schematu. Przypadki takie są wykrywane w trakcie pracy programu.

Przedstawione sposoby wyznaczania cykli-komórek wymagają więc rozszerzenia polegającego na wykorzystywaniu także par węzłów, dla których osiągalność jest większa od dwa. Przypadki takie dalej nazywać będziemy przypadkami specjalnymi. Dalsze sposoby wyznaczania cykli-komórek przedstawimy wykorzystując przykłady na rysunkach 2.7.8, 2.7.9. Sposoby te uruchamiane są, gdy po pewnym etapie (niekoniecznie pierwszym) nie występują pary węzłów z osiągalnością zwyczajną, z których można by utworzyć nowe cykle-komórki. Wyznacza się wtedy pary węzłów, dla których osiągalność jest równa k. Analizę rozpoczyna się od k = 3.

Trzeci sposób wyznaczania cykli-komórek

Przy kojarzeniu par węzłów dolnego w_{dk} i górnego w_{gk} komórek korzystać będziemy z osiągalności równej 3. Z węzła dolnego w_d wyznacza się wtedy trzy drogi do węzła górnego w_g. Jeżeli sieć jest płaska zredukowana (bez podsieci), to tylko dwie drogi spośród trzech wyznaczonych mogą być granicami poszukiwanej komórki. Na rys. 2.7.8a od węzła dolnego 1 do węzła górnego 9 występują trzy drogi: 1 2 8 9, 1 8 9 oraz 1 9 (w tym przykładzie trzecia droga jest bocznicą, lecz w ogólnym przypadku może też być drogą). Sprecyzować trzeba sposób rozstrzygania o tym, które z tych trzech dróg należy przyjąć jako dwie granice poszukiwanej komórki. Wykorzystamy tu informacje o narożnikach bocznych występujących przy węzłach każdej drogi.

Wcześniej w opisie metody podano, że po wyznaczeniu każdego cyklu-komórki, z tego cyklu między innymi są wyodrębniane narożniki i zapisywane w odpowiedniej tabeli narożników. Dla drogi, która jest granicą komórki, musi być spełniony warunek: wszystkie narożniki boczne węzłów tej drogi (z wyjątkiem węzłów w_{dk} i w_{gk}) w tabeli narożników muszą być wolne (tzn. do tej pory nie zostały wyznaczone i zapisane w tej tabeli). W interpretacji graficznej na rysunkach: 2.7.6, 2.7.7, 2.7.8, 2.7.9 wyznaczane cykle-komórki, a także cykle zależne zastępcze dla ilustracji przedstawianej metody nanoszone są za pomocą odpowiednio linii lub łuków przerywanych i kropkowanych. Wykorzystanie jakiegoś narożnika w dotychczas wyznaczonych cyklach komórkach zapisywane jest w pamięci komputera w odpowiedniej tabeli narożników. W interpretacji graficznej na rysunku można to kojarzyć z nanoszeniem wymienionych linii przerywanych lub kropkowanych przy bocznicach związanych z danym cyklem i węzłem.



Rys. 2.7.8. Wyznaczanie cyklu-komórki z osiągalności specjalnej 3

Fig. 2.7.8. Determination of the cell-cycle basing on the special attainability 3

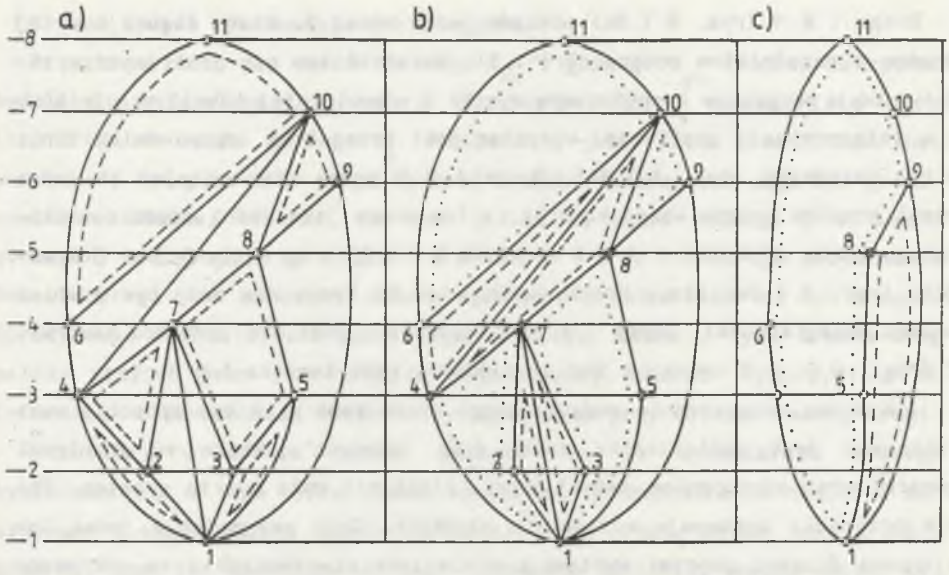
Droga 1 8 9 (rys. 2.7.8a) posiada jeden węzeł 8, który figuruje w tej drodze z narożnikiem bocznym 8:(-1,9). Narożnik ten nie jest jeszcze zajęty, co w programie komputerowym wynika z odpowiedniej tabeli narożników, a w interpretacji graficznej wyrażone jest przez brak odpowiednich linii w tym narożniku (rys. 2.7.8a). Drogę 1 8 9 można więc przyjąć za jedną część granicy poszukiwanej komórki, a tym samym jako jedną część poszukiwanego cyklu. W drodze 1 2 8 9 narożnik 2:(-1,8) przy węźle 2 jest już zajęty (rys. 2.7.8a, linie kropkowane), więc ta droga nie może być granicą poszukiwanej komórki. Droga 1 9 jest bocznicą - jest więc granicą komórki. Z dróg 1 8 9, 1 9 tworzony jest poszukiwany cykl-komórka 1 8 9 -1.

Jak widać, wyznaczenie poszukiwanego cyklu komórki w tym sposobie uwarunkowane jest znalezieniem dwóch dróg "dobrych", które są granicami komórki oraz odrzuceniem jednej drogi, która nie może być tą granicą. Takie przypadki występują w sieciach płaskich. Inne przypadki z jedną lub z trzema drogami dobrymi występują w sieciach niepłaskich i są wykrywane wcześniej wymienionymi sposobami rozstrzygania o nieplanarności sieci.

Czwarty sposób wyznaczania cykli-komórek

W niektórych bardzo szczególnych przypadkach posługiwanie się trzecim sposobem wyznaczania cykli-komórek nie jest wystarczające. W sposobie 4 przy kojarzeniu węzłów dolnego w_{dk} i górnego w_{gk} komórek korzystać będziemy z osiągalności równej 4. Wyznaczane będą cztery drogi $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$, przy czym jedna z tych dróg musi być bocznicą w_{dk} w_{gk} (rys. 2.7.9a, $w_{dk} = 1$, $w_{gk} = 7$). W takim przypadku w sieci płaskiej z trzech wyznaczonych dróg nie będących bocznicą tylko dwie drogi mogą być granicami dwu komórek, a jedną z tych dróg należy odrzucić (rys. 2.7.9a). Z dwu dróg dobrych $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$ oraz z bocznicy w_{dk} w_{gk} utworzone zostaną dwa cykle-komórki, każdy z jednej drogi $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$ oraz z bocznicy w_{dk} w_{gk}. Rozstrzyganie o tym czy dana droga może być granicą komórki, czy nie (podobnie jak w sposobie trzecim), realizowane jest poprzez analizę narożników bocznych węzłów każdej drogi.

W przykładzie na rys. 2.7.9a w kolejnym etapie programu, po wyczerpaniu wszystkich możliwości wynikających ze sposobów 1, 2, 3 wyznaczania cykli-komórek, stwierdzono osg(1,7) = 4. Istnieje bocznica 1 7 oraz trzy drogi: 1 4 7, 1 2 7, 1 3 7. Analiza narożników bocznych przy węzłach tych dróg wskazuje, że drogę 1 4 7 należy odrzucić ze względu na to, że narożniki: 4:(1,-2), 4:(-2,7) zostały już wcześniej wyznaczone i są już zajęte. Drogi 1 2 7 oraz 1 3 7 spełniają warunki odnośnie do narożników bocznych przy węzłach odpowiednio 2 i 3 (rys. 2.7.9a). Z wyznaczonych dróg oraz z bocznicy 1 7 utworzone zostały dwa cykle-komórki 1 2 7 -1, 1 3 7 -1.



Rys. 2.7.9. Wyznaczanie cyklu-komórki z osiągalności specjalnej 4

Fig. 2.7.9. Determination of the cell-cycle basing on the special attainability 4

W schemacie na rys. 2.7.9a identyczna analiza jest potrzebna przy wyznaczaniu cykli-komórek od węzła 4 do węzła 10. Droga 4 7 8 10 zostaje odrzucona ze względu na to, że narożnik boczny 9:(-8,10) przy węźle 9 został już wcześniej zajęty.

Dalszy przebieg algorytmu w analizowanych przykładach doprowadza do sytuacji pokazanej na rys. 2.7.8c i rys. 2.7.9c. Następne etapy wyznaczania ostatnich cykli-komórek zostały już omówione wcześniej.

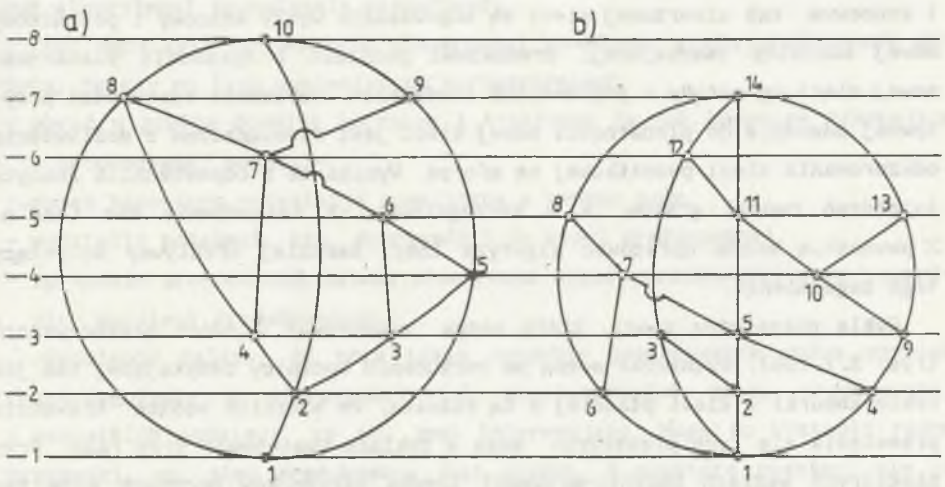
Przeprowadzone badania planarności sieci wskazują, że sprecyzowane dwa sposoby tworzenia elementarnych cykli-komórek, w których wykorzystuje się tzw. osiągalność zwyczajną oraz następne dwa sposoby, w których wykorzystuje się tzw. osiągalność specjalną, są wystarczające w proponowanej metodzie. Na podstawie przedstawionej metody wyznaczania cykli komórek, a tym samym badania planarności sieci, opracowany został program komputerowy realizujący wszystkie wymienione elementy metody. Przy testowaniu programu wykorzystano około 200 przykładów sieci lub podsieci płaskich i niepłaskich o liczbie bocznic do 150. W każdym przypadku sieci płaskich lub niepłaskich w trakcie testowania uzyskiwano rozstrzygnięcia poprawne.

Wadą przedstawionej metody jest konieczność wcześniejszego wydzielenia podsieci i zastępowania ich w modelu struktury jedną bocznicą, a także skromne informacje o rodzaju nieplanarności. Niektóre wskazówki sugerujące dalsze możliwe rozwinięcie przedstawionej metody podano w rozdz. 2.7.5.

W trakcie badań wybranych sieci wentylacyjnych kopalń istniejących nie natrafiono na sieć płaską. Spotyka się natomiast podsieci, które są płaskie. Dotyczy to zwłaszcza fragmentów kopalń, w których roboty górnicze prowadzone są w jednym pokładzie lub w kilku pokładach, lecz bez wyrobisk tworzących połączenia międzyrejonowe i bez mostów wentylacyjnych. Nieplanarność dużych sieci utrudnia sporządzanie graficznego obrazu tych sieci w postaci prostego schematu kanonicznego lub potencjalnego. Oprócz rozstrzygania o nieplanarności sieci potrzebne są więc dalsze informacje opisujące tę nieplanarność, co powinno być przedmiotem dalszych badań. Niektóre uwagi w tym zakresie podano w następnym rozdziale.

2.7.5. Uwagi o możliwości traktowania schematu kanonicznego jako obiekt w przestrzeni trójwymiarowej

Jak już wspomniano, większość schematów kanonicznych sieci wentylacyjnych kopalń lub podsieci to schematy niepłaskie. Stwarza to pewne utrudnienia w rysowaniu tych schematów, a także w ich czytelności, interpretacji właściwości sieci i poszczególnych bocznic. Kopalnia głębinowa jest obiektem istniejącym w trójwymiarowej bryle górotworu. Pokazuje to schemat przestrzenny sieci kreślony właśnie jako obiekt przestrzenny. Próby planaryzacji schematu kanonicznego dużej sieci niepłaskiej rzadko przynoszą zamierzone efekty poprawienia czytelności. W tym miejscu można więc postawić pytanie: czy nie podjąć próby przedstawiania schematu kanonicznego



Rys. 2.7.10. Przykład schematu kanonicznego odwzorowanego na sferze (a) i w dwu płaszczyznach (b)

Fig. 2.7.10. Example of a canonic diagram represented on a sphere (a) and in two planes (b)

traktowanego jako obiekt w przestrzeni? Na pytanie to nie odpowiemy jeszcze w tej pracy. Niemniej jednak trzeba stwierdzić, że istnieją pewne przesłanki co do możliwości uporządkowania węzłów i bocznic w schemacie kanonicznym przedstawianym w przestrzeni trójwymiarowej. Wspomniano już także, że stosowanie techniki komputerowej może znacznie pomóc we wprowadzeniu obranego uporządkowania w zbiorach węzłów i bocznic oraz w uściśleniu interpretacji geometrycznej. Przydatne tu mogą być także dalsze osiągnięcia teorii grafów.

Analiza niektórych schematów wskazuje, że mogą one być utożsamiane z jakimiś obiektami w przestrzeni trójwymiarowej. I tak na przykład schematy na rysunkach 2.7.5b, 2.7.10a mogą być odwzorowane na sferze, schematy na rysunkach 2.7.5a,c, 2.7.10b można odwzorować w dwu płaszczyznach. Schemat na rysunku 2.7.10a można kojarzyć ze sferą przeciętą płaszczyzną 2 4 8 7 6 5 3 2. Ten ostatni utworzono ze schematu z rysunku 2.7.2c przez dołożenie trzech bocznic. Identyfikacja takich obiektów w przestrzeni wymaga opracowania dalszych algorytmów. Przypuszczać można, że będą tu przydatne także metody, w których wyznaczać się będzie cykle niezależne, biegnące od swojego węzła dolnego do górnego i z powrotem w dół, podobnie jak cykle-komórki w sieci płaskiej.

Metodą przedstawioną w poprzednich rozdziałach można już sprawdzać możliwość odwzorowania sieci na sferze. W tym celu należy najpierw odrzucić bocznicę zamykającą, obrać dowolną bocznicę za nową zamykającą, nadać bocznicom nową orientację acykliczną przyjmując, że węzłem początkowym i końcowym tak utworzonej sieci są odpowiednio węzły końcowy i początkowy nowej bocznicy zamykającej, zredukować podsieci i sprawdzić planarność nowej sieci wg metody z poprzednich rozdziałów. Uzyskanie odpowiedzi pozytywnej odnośnie do planarności nowej sieci jest równoznaczne z możliwością odwzorowania sieci początkowej na sferze. Wynika to z odpowiednich znanych twierdzeń teorii grafów, a w szczególności z twierdzenia Mac Lane'a. Z pewnością można opracować algorytm inny, bardziej efektywny dotyczący tego zagadnienia.

Cykle niezależne sieci, którą można odwzorować w dwóch płaszczyznach (rys. 2.7.10b), wyznaczać można po odrzuceniu bocznicy zamykającej tak jak cykle-komórki w sieci płaskiej z tą różnicą, że bocznice będące krawędzią przecięcia się tych płaszczyzn mogą w cyklach występować trzy razy. Przy niektórych węzłach bocznic-krawędzi liczba narożników bocznych może być większa od 2. Bocznice leżące w ciągach bocznic ograniczających schemat w przestrzeni w proponowanych cyklach występować będą tylko jeden raz. Powyższe uwagi wynikają z twierdzenia Mac Lane'a zastosowanego oddzielnie

do każdej z płaszczyzn, w których odwzorowany jest schemat. Prawdopodobnie spostrzeżenia te można uogólnić na przypadki, w których schemat jest odwzorowany w kilku płaszczyznach. Przedstawione propozycje identyfikacji kształtu schematu kanonicznego i próby traktowania tego schematu jako obiektu w przestrzeni trójwymiarowej należy uważać za interesujące. Zagadnienie to wymaga jednak odrębnego opracowania.

2.7.6. Możliwość uogólnienia proponowanej metody badania planarności na dowolne grafy

Przedstawioną w poprzednich rozdziałach metodę badania planarności można uogólnić na dowolne grafy. Najpierw jednak należy spowodować, by były spełnione założenia przyjęte w proponowanej metodzie, tzn. by była to sieć acykliczna zredukowana.

Przed analizą planarności grafów w znanych dotychczas metodach stosuje się zawsze uproszczenia wstępne polegające na redukcji grafu a nie mające wpływu na planarność lub nieplanarność. Uproszczenia te np. wymienia Deo [45 str.396], a polegają one na wyznaczeniu składowych spójności, usunięciu wszystkich pętli i krawędzi równoległych, likwidacji półwęzłów, podziału grafu na bloki. W blokach przeprowadza się dalszą redukcję pętli, półwęzłów i połączeń równoległych. Każdy blok poddawany jest najpierw testowi liczbowemu sprawdzania spełnienia warunku koniecznego na nieplanarność, a w przypadku nieuzyskania rozstrzygnięcia poddawany jest jakiemuś algorytmowi sprawdzania planarności.

Aby umożliwić sprawdzenie planarności dowolnego grafu proponowaną metodą, należy po tych wymienionych uproszczeniach:

- obrać w grafie dowolną bocznicę i traktować ją jak bocznicę zamykającą w proponowanej metodzie,
- nadać bocznicom orientację acykliczną w sensie dróg,
- wydzielić podsieci, tzn. doprowadzić do sieci zredukowanej,
- sprawdzić proponowaną metodą planarność sieci zredukowanej oraz wszystkich podsieci zredukowanych.

Nadmienić należy, że przy takim sposobie postępowania można uzyskać rozstrzygnięcie o planarności lub nieplanarności sieci zredukowanej i wszystkich podsieci, co też jest interesujące. Mogą tu wystąpić różne przypadki, np. sieć zredukowana jest płaska, a niektóre podsieci nie są płaskie. Właściwości sieci wynikające z niepłaskości podsieci ograniczają się wtedy tylko do tych podsieci niepłaskich. Na zagadnienie to zwrócimy dalej uwagę w rozdz. 2.8.3 i 2.8.4.

2.8. Badania charakteru bocznic w sieci

2.8.1. Sposoby definiowania bocznic normalnych i przekątnych

Jednym z bardzo ważnych zagadnień bezpieczeństwa kopalnianej sieci wentylacyjnej jest odpowiednia trwałość prądów powietrza docierających do miejsc pracy załogi. Zagadnienie to wiąże się z możliwością powstawania licznych stanów awaryjnych w sieci spowodowanych uszkodzeniami niektórych elementów, a także z pojawianiem się dodatkowych czynników wpływających na skład, właściwości i przepływ powietrza w kopalni. Wiadomo, że w niektórych sytuacjach awaryjnych istnieją duże trudności z utrzymaniem nie tylko określonej ilości powietrza w wybranej bocznicy, lecz także z utrzymaniem pożądanych kierunków przepływu.

Nauka o przewietrzaniu kopalń, a także praktyka górnicza wypracowały wiele sposobów zapobiegania występowaniu stanów awaryjnych oraz postępowania przy likwidacji awarii i jej skutków, a zwłaszcza ratowania załogi. Ogromne znaczenie w tym zakresie posiadają pionierskie prace badawcze H. Czeczotta i W. Budryka, rozwijane dalej przez S. Barczyka i H. Bystronia. W pracy [31] podkreśloho znaczenie dotychczas znanych teorii dotyczących stabilizacji kierunków przepływu powietrza w różnych stanach awaryjnych. W następnych badaniach prowadzonych w tym zakresie podawane są rozwiązania ujmujące w sposób bardziej szczegółowy zachodzące procesy termodynamiczne, a także przepływy nieustalone [137,104,93,46,136].

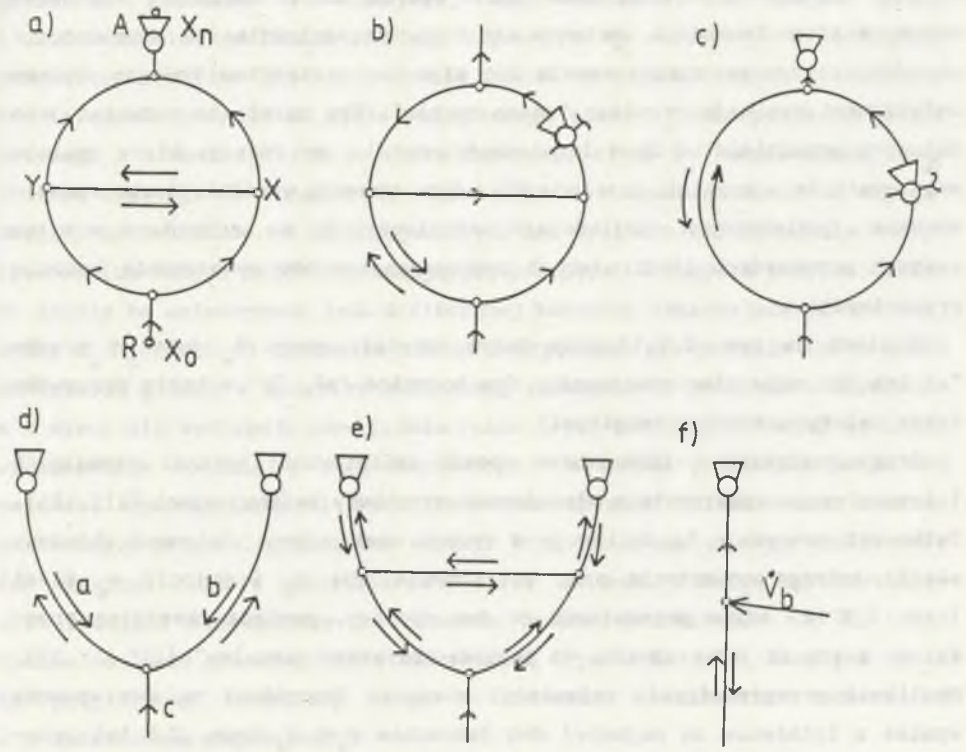
Zmiany kierunków przepływu powietrza w kopalni mogą być spowodowane różnymi czynnikami.

- zmianą oporów bocznic,
- zmianą przebiegów charakterystyk wentylatorów głównych,
- pracą w sieci wentylatorów pomocniczych,
- wystąpieniem w kopalni czynników wywołujących istotne zmiany gęstości powietrza lub generujących znaczące dopływy do sieci masy (objętości) innych gazów (silne nagrzewanie powietrza, pożary, wyrzuty gazów i skał),
- opadaniem wody w szybach, szybikach lub urobku w zbiornikach, otworach zsypnych lub wiertniczych.

Często wymienione czynniki występują łącznie, co utrudnia sprecyzowanie przyczyn doprowadzających do zmian kierunków. Wiadomo także, że liczba

bocznic w sieci, w których takie zmiany kierunków są możliwe, uzależniona jest od rodzaju występującego zaburzenia. Gdy występują tylko zmiany oporów bocznic, to przynajmniej w niektórych sieciach istnieją bocznice z jednoznacznym kierunkiem przepływu. Nie oznacza to wcale, że w bocznicach tych po zaistnieniu w sieci innych zaburzeń, np. pożaru lub wyrzutu, kierunek przepływu także będzie jednoznaczny.

Zdaniem autora rozstrzyganie o jednoznaczności kierunków przepływu powietrza, a zwłaszcza podawanie różnych miar oceniających trwałość (stabilność) kierunków, powinno być związane z rodzajem i miejscem występującego zaburzenia. W bocznicach normalnych nie występują zmiany kierunków przepływu spowodowane zmianami oporów bocznic, a odwrócenia w tych bocznicach są możliwe w sytuacjach pożarowych lub wyrzutowych.



Rys. 2.8.1. Przykłady sieci z bocznicami o niejednoznacznym kierunku przepływu powietrza

Fig. 2.8.1. Example of networks with branches in non-univocal direction of air flow

Na rys. 2.8.1 podano kilka prostych znanych przykładów, w których występują bocznice z niejednoznacznym kierunkiem przepływu. Spotykane w literaturze definicje poszczególnych prądów nie zawsze są precyzyjne. Za celowe należy uważać uściślenie nazewnictwa w tym zagadnieniu.

W niniejszym rozdziale pracy zwrócimy uwagę na charakter poszczególnych bocznic (normalna, przekątna). Jest to zagadnienie węższe w stosunku do niejednoznaczności kierunków przepływu przy pracy kilku źródeł ruchu powietrza w sieci. Dalej przedstawimy kilka uwag dotyczących sposobów definiowania prądu (bocznicy) normalnego i przekątnego.

W literaturze spotykamy dwa sposoby definiowania tych prądów. W pierwszym z nich w definicji wymieniane są właściwości prądu normalnego, który "nie zmienia swego kierunku pod wpływem zmian oporów bocznic sąsiednich" oraz przekątnego, "który zmienia swój kierunek przepływu pod wpływem zmian oporów bocznic sąsiednich" [21,25]. Niektórzy autorzy zamiast zmian oporów bocznic sąsiednich używają słów "zmian oporów innych bocznic". W przytoczonych sformułowaniach wymienia się bocznice sąsiednie lub inne bocznice, bez bliższego sprecyzowania na czym to sąsiedztwo polega. Dalsze wątpliwości wynikają ze słów: "zmian oporów". Czy należy to rozumieć jako zmiany w przedziale od zera do nieskończoności, czy zmiany, które realnie mogą wystąpić w kopalni, a w związku z tym wymagają wcześniejszego sprecyzowania. W niektórych publikacjach wątpliwości te są wyjaśniane w dołączanych przykładach ilustrujących proponowane metody wyznaczania bocznic przekątnych.

W sieci na rys. 2.8.1d przy dużym wzroście oporu R_c jeden z prądów "a" lub "b" może ulec odwróceniu. Czy bocznice "a", "b" w takim przypadku także należy nazywać przekątnymi?

Drugi spotykany w literaturze sposób definiowania bocznic normalnych i przekątnych wykorzystuje właściwości strutkury badanej sieci [112,121]. Sułkowski precyzuje tę definicję w sposób następujący: "element składowy sieci, którego orientację przy ustalonym wlocie x_0 i wylocie x_n sieci (rys. 2.8.1a) można przedstawić na dwa sposoby, posiada charakter przekątny, a gdy na jeden sposób, to posiada charakter normalny" [121 str.33]. Możliwość przeprowadzenia orientacji elementu (bocznicy) na dwa sposoby wynika z istnienia co najmniej dwu łańcuchów $x_0 \rightsquigarrow x_n$ (rys. 2.8.1a) przechodzących przez ten element, w których to łańcuchach węzły krańcowe analizowanej bocznicy figurują w odwrotnej kolejności. Podobny sens topologiczny zawarty jest w definicjach bocznicy przekątnej i normalnej podanych przez Simode'a [112]. W pracy tej w definicji bocznicy przekątnej X Y wyróżniono istnienie czterech łańcuchów parami rozłącznych (rys. 2.8.1a):

- dwa łańcuchy rozłączne R~>X, Y~>A umożliwiające przepływ od węzła X do węzła Y,
- dwa łańcuchy rozłączne R~>Y, X~>A umożliwiające przepływ od węzła Y do węzła X.

Bocznica X Y jest normalna w sensie przepływu od X do Y, gdy:

- istnieją co najmniej dwa rozłączne łańcuchy R~>X, Y~>A,
- żadna para łańcuchów R~>Y, X~>A nie jest rozłączna.

Węzły X, Y są węzłami krańcowymi analizowanej bocznicy, zaś węzły R, A są węzłami odpowiednio wlotowym i wylotowym z sieci lub z podsieci (rys. 2.8.1a).

W przytoczonych definicjach topologicznych bocznic normalnych i przekątnych uwypuklony jest zasadniczy kierunek przepływu powietrza w sieci, to jest od węzła początkowego x_0 (rys. 2.8.1a) do węzła końcowego sieci x_n, korespondujący z celem istnienia sieci, to jest z czerpaniem powietrza świeżego z atmosfery, doprowadzaniem do miejsc pracy i odprowadzaniem powietrza zużytego z powrotem do atmosfery. W bocznicach przekątnych możliwe jest prowadzenie powietrza w dwu różnych kierunkach. Przynależność bocznic do węzła początkowego sieci x_0 (czerpanie powietrza świeżego z atmosfery) lub do węzła końcowego sieci x_n (odprowadzanie powietrza zużytego do atmosfery) wiąże się z zastosowanym sposobem organizacji przewietrzania. W definicjach tych nie wymienia się położenia wentylatorów lub innych źródeł wymuszających przepływ. W domyśle przyjmuje się, że źródło to umieszczone jest w fikcyjnej bocznicy (zamykającej), łączącej węzły x_n x_0. Jest to zgodne ze stanem faktycznym, gdy pracuje tylko jeden wentylator główny w bocznicy połączonej szeregowo z bocznicą zamykającą, a w sieci nie występują inne źródła ruchu (rys. 2.8.1a). W takiej sytuacji wyszukiwanie bocznic z niejednoznacznym kierunkiem przepływu powietrza metodami wykorzystującymi wymienione dwa sposoby definiowania bocznic przekątnych przynosi identyczne wyniki. Przy innym usytuowaniu wentylatora lub większej liczbie wentylatorów w sieci wnioski z metod wykorzystujących różniące się sposoby definiowania bocznic przekątnych nie są identyczne, co może prowadzić do nieporozumień (rys. 2.8.1a,b). Stąd też wynika przytoczona wcześniej uwaga o celowości uściślenia nazewnictwa w przedmiotowym zagadnieniu.

W opracowanych dalej metodach wyznaczania bocznic przekątnych wykorzystywać będziemy podane wcześniej definicje tych bocznic, w których to definicjach rozpatruje się właściwości struktury sieci. Opracowane algorytmy zezwalają także uwzględnianie możliwości dowolnego położenia źródeł wymuszających przepływ powietrza przez kopalnię.

Zagadnienie prądów przekątnych należy analizować nie tylko ze względu na niekorzystne ich właściwości niebezpiecznej lub przypadkowej zmiany kierunku przepływu przy zmianach oporów innych bocznic. Teoria wentylacji kopalń, a także praktyka znają wiele sytuacji, w których celowo wykorzystuje się właściwości tych prądów. Zastosowania te można uszeregować w następujący sposób:

- lokalne rewersje wentylacji dla ograniczenia strefy bezpośredniego zadymienia lub ratowania załogi w czasie pożarów:
  - w metodach krótkich spięć przy niektórych pożarach w szybach wdechowych,
  - w metodach krótkich spięć przy niektórych pożarach w prądach grupowych powietrza świeżego,
  - w stosowanych metodach zabezpieczeń oddziałów podpoziomowych i niektórych prądów schodzących [26],
  - w proponowanych metodach ratowania załogi w niektórych oddziałach wydobywczych [79],
- przyspieszenie gaszenia pola pożarowego w bocznicach przekątnych,
- profilaktyka przeciwpożarowa przy zagrożeniu pożarami endogenicznymi w zrobach ścian zawałowych.

W wielu sytuacjach istotne jest nie tylko stwierdzenie przekątności bocznicy lub ciągu bocznic przekątnych, lecz także wskazanie potrzebnych dróg i środków umożliwiających celową zmianę kierunku przepływu albo celową zmianę rozkładu ciśnienia powietrza w sieci.

Wymienione w niniejszym punkcie pracy uwagi dotyczące prądów przekątnych w sieci wskazują na celowość prowadzenia dalszych badań w tym zakresie. Niektóre z poruszonych zagadnień będą przedmiotem analizy w następnych rozdziałach.

2.8.2. Wyznaczanie bocznic normalnych i przekątnych z wszystkich łańcuchów przez sieć

Wielokrotnie wspomniano już o celowości przeprowadzania analiz wielu zagadnień kopalnianej sieci wentylacyjnej, w tym także przekątności bocznic z wykorzystaniem komputera. Rozwiązanie tego zagadnienia wymaga wyboru odpowiedniej istniejącej metody badania przekątności lub opracowania nowej takiej metody, sprecyzowania algorytmu, opracowania i przetestowania programu. W literaturze zagadnienie klasyfikacji prądów powietrza było przedmiotem rozważań w pracach H. Bystronia [25], E. Simode'a [112], W. Müllera [92].

E. Simode przedstawia metodę określania charakteru bocznic bazującą na przytoczonych wcześniej definicjach bocznicy przekątnej i normalnej [112]. Uzyskuje ciekawe rozwiązania dla sieci płaskich i niepłaskich. Do tych rozwiązań powrócimy w następnych rozdziałach. W przedstawionym przykładzie takiej analizy, zdaniem autora, występują jednak błędy. Dlatego też nie będziemy szczegółowo analizowali algorytmu podanego w pracy [112]. Do przykładu z pracy [112] powrócimy pod koniec rozdziału.

Metoda wyznaczania bocznic przekątnych podana przez W. Müllera dotyczy jedynie pewnej grupy bocznic [92]. Szerzej zagadnienie to będzie poruszane w rozdz. 2.8.5. W pracy [92] nie uwzględnia się podsieci przekątnych, w których podobnie jak w pojedynczej bocznicy może nastąpić zmiana kierunku przepływu we wszystkich bocznicach podsieci jednocześnie. Wprowadzony przez Müllera podział węzłów na odpowiednie typy także budzi zastrzeżenia ze względu na brak typu węzłów posiadających jednocześnie więcej niżjedną bocznicę z dopływem i z wypływem z węzła.

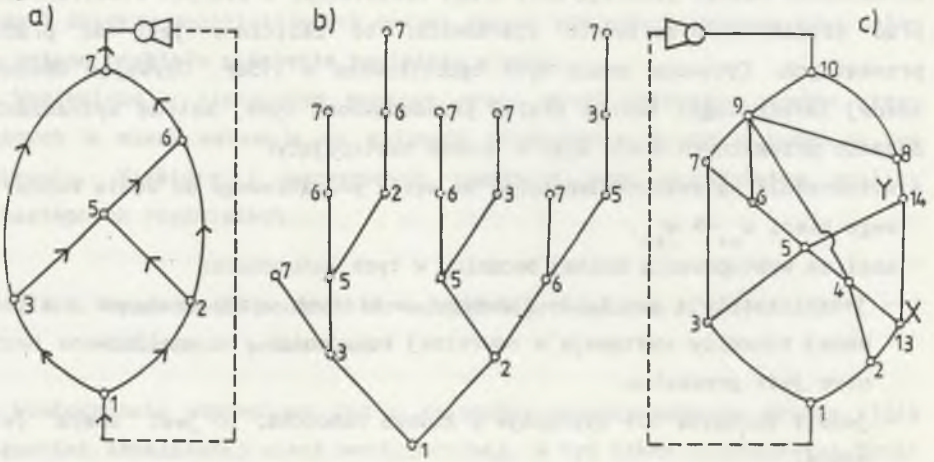
H. Bystroń do wyznaczania bocznic przekątnych [25] stosuje wydzielanie w sieci wszystkich możliwych "dróg prawie niezależnych", obejmujących klasyfikowany prąd. Wydzielanie to jest realizowane za pomocą "prawie doskonale szczelnych tam izolacyjnych". Jeżeli we wszystkich tych drogach klasyfikowany prąd zachowuje ten sam kierunek, to zaliczany jest do prądów normalnych. Jeżeli istnieją dwie drogi niezależne, w których klasyfikowany prąd płynie w przeciwnych kierunkach, to zaliczany jest do prądów przekątnych. Cytowana praca była opublikowana w 1956r. Używając obecnie znanej terminologii teorii grafów przedstawioną wyżej metodę wyznaczania bocznic przekątnych można ująć w sposób następujący:

- wyznaczenie wszystkich łańcuchów od węzła początkowego do węzła końcowego sieci $w_{ps} \rightsquigarrow w_{ks}$,
- analiza występowania każdej bocznicy w tych łańcuchach:
  - jeżeli istnieją dwa takie łańcuchy, w których węzły krańcowe analizowanej bocznicy występują w odwrotnej kolejności, to analizowana bocznica jest przekątna,
  - jeżeli bocznica nie występuje w żadnym łańcuchu, to jest "ślepa" (wisząca),
  - w przeciwnych przypadkach analizowana bocznica jest normalna.

Metodę tę wykorzystano do opracowania odpowiedniego algorytmu i programu komputerowego klasyfikującego bocznice. Ze względów praktycznych wprowadzono niektóre dalsze uściślenia. Nadawanie bocznicom orientacji, czyli obieranie, który z węzłów jest początkowy, a który końcowy danej bocznicy, realizowane jest w trakcie opracowywania modelu numerycznego sieci,

a konkretnie w czasie zapisu struktury sieci. Za naturalne należy wtedy uważać przyjmowanie orientacji bocznic w sieci istniejącej, zgodnej z rzeczywistymi kierunkami przepływu. W sieci projektowanej lub we fragmencie projektowanym orientację tę w naturalny sposób przyjmuje się jako zgodną z zamierzonymi kierunkami przepływu.

Nadanie orientacji realizowane jest więc wcześniej niż możliwość sprawdzenia programem czy daną bocznicę można zorientować na dwa sposoby, czy nie. Wydawać się więc może, że fakt ten jest w sprzeczności z definicją bocznicy przekątnej podaną przez Sułkowskiego, w której to definicji, jak to już wspomniano, możliwość dwojakiego zorientowania bocznicy kwalifikuje bocznicę do przekątnych. Zdaniem autora nadanie bocznicy a priori wybranej orientacji bez sprawdzania czy orientacja przeciwna jest możliwa, nie przekreśla możliwości sprawdzania przekątnego charakteru bocznicy. Istotne jest występowanie węzłów tej bocznicy w odpowiednich dwóch łańcuchach w kolejności w_p w_k oraz przestawionej w_k w_p. W programie założono także, że w wydruku danego łańcucha odwrotne występowanie węzłów krańcowych bocznicy będzie sygnalizowane przez podanie znaku "-", tzn. w_k $-w_p$. Ułatwia to analizę występowania bocznic w łańcuchach.



Rys. 2.8.2. Przykład schematu kanonicznego sieci przekątnej (a), graf wszystkich łańcuchów w sieci z rys."a" od węzła 1 do węzła 7 (b), przykład sieci niepłaskiej z pracy [112] (c)

Fig. 2.8.2. Example of a canonic diagram of a diagonal network (a), a graph of all the network chains in Fig."a" from node 1 to node 7 (b), example of a not flat network after [112] (c)

Dalsza modyfikacja dotyczy wprowadzenia tzw. bocznicy źródłowej. Może nią być bocznica zamykająca wtedy, gdy analizujemy przekątność bocznic względem wlotu i wylotu sieci lub dowolna inna bocznica, w której zabudowany jest wentylator. Odpowiednie łańcuchy w sieci wyznaczane są wtedy od jednego do drugiego węzła krańcowego tej zadanej bocznicy źródłowej. Wyznaczanie tych łańcuchów realizowane jest metodą przeszukiwania grafu "w głąb" [45,75].

Podany dalej przykład dotyczy przypadku, gdy bocznicą źródłową jest bocznica zamykająca w sieci (rys. 2.8.2). W tabeli 2.8.1 podano zestawienie wszystkich wyznaczonych programem możliwych łańcuchów od węzła początkowego sieci 1 do węzła końcowego sieci 7. Łańcuchy te przedstawiono także w postaci grafu rys. 2.8.2b.

Tabela 2.8.1

Zestawienie wszystkich możliwych łańcuchów od węzła 1 do węzła 7 w sieci z rys. 2.8.2a

1	2	6	-5	-3	7
1	2	6	7		
1	2	5	-3	7	
1	2	5	6	7	
1	3	5	-2	6	7
1	3	5	6	7	
1	3	7			

Tabela 2.8.2

Analiza charakteru bocznic w sieci z rysunku 2.8.2a

w_p	w_k	1"+"	1"-"	Charakter
7	1	0	0	źródłowa
1	2	4	0	normalna
1	3	3	0	normalna
2	6	3	0	normalna
2	5	2	1	przekątna
3	5	2	2	przekątna
3	7	3	0	normalna
5	6	2	1	przekątna
6	7	4	0	normalna

w_p, w_k - węzły początkowy i końcowy bocznicy,
1"+", 1"-" - liczby występowania bocznicy ze znakiem dodatnim i ujemnym w łańcuchach w tab. 2.8.1

W programie dla każdej bocznicy wyznacza się także:
- 1"+" liczbę występowania bocznicy we wszystkich łańcuchach ze znakiem dodatnim,
- 1"-" liczbę występowania bocznicy we wszystkich łańcuchach ze znakiem ujemnym.

Liczby te zestawiono w trzeciej i czwartej kolumnie tabeli 2.8.2. Analiza tych liczb umożliwia określenie charakteru bocznicy. Można tu wyróżnić następujące przypadki:

- 1"+" > 0 i 1"-" = 0, wtedy bocznica jest normalna i posiada orientację zgodną z bocznicą źródłową (w przykładzie bocznicą źródłową jest bocznica zamykająca 7 1). Kierunek przepływu powietrza w analizowanej bocznicy jest jednoznaczny i zgodny z założonym,
- 1"+" = 0 i 1"-" > 0, wtedy bocznica jest normalna, lecz posiada orientację niezgodną z bocznicą źródłową. Kierunek przepływu powietrza jest jednoznaczny, lecz jest przeciwny do założonego (w przedstawionym przykładzie przypadek taki nie występuje),
- 1"+" > 0 i 1"-" > 0, wtedy bocznica jest przekątna względem bocznicy źródłowej. Kierunek przepływu nie jest jednoznaczny.

W przykładzie na rys. 2.8.3c, pochodzącym z artykułu Simode'a [112], wyznaczono programem 165 łańcuchów od węzła początkowego 1 do węzła końcowego sieci 10. Stwierdzono istnienie pięciu bocznic normalnych. Są to bocznice 1 2, 1 3 związane z węzłem początkowym sieci 1, bocznice 9 10, 8 10 związane z węzłem końcowym sieci 10 oraz bocznica 14 8. Przekątną jest także bocznica 13 14, co Simode stwierdza w analizie tego przykładu. Bocznicę 3 7 zalicza jednak do normalnych (stable). Analiza przeprowadzona wymienionym programem wskazuje natomiast, że bocznicę 3 7 także należy zaliczyć do przekątnych. Występuje ona w 59 łańcuchach ze znakiem "+" oraz w 4 łańcuchach ze znakiem "-". Ze znakiem "-" występuje na przykład w łańcuchu 1 2 4 9 -7 -3 5 14 8 10. Gdyby zaistniała konieczność zmiany kierunku przepływu powietrza w tej bocznicy, to można to uzyskać prowadząc powietrze wzdłuż tego łańcucha. Wymagałoby to oczywiście zmiany oporów dużej liczby bocznic. W przedstawionej metodzie uzyskuje się więc także propozycję co do organizacji przewietrzania w przypadku konieczności zmiany kierunku przepływu powietrza w wybranej bocznicy przekątnej. W praktyce obliczenia symulacyjne rozpływu powietrza przeprowadzone przy założeniu konkretnych oporów tam wentylacyjnych lub wyrobisk powinny przynieść odpowiedź, czy wystąpią takie zmiany kierunków przepływu..

Efektywność przedstawionej metody i programu komputerowego analizy przekątności bocznic uzależniona jest od szybkości pracy dostępnego komputera oraz od wielkości i struktury sieci. Graf możliwych łańcuchów (rys. 2.8.2b) bardzo szybko rozrasta się wraz ze wzrostem liczby bocznic, zwłaszcza dla sieci niepłaskich. Stosowane obecnie w Polsce w działach wentylacji kopalń komputery typu IBM PC o szybkości pracy zegara od 4 do 33 MHz umożliwiają przeprowadzenie przedstawionej analizy dla fragmentów sieci lub podsieci o liczbie bocznic do około 50 w realnym czasie od kilkunastu sekund do kilkunastu minut. Dla większych sieci czas ten bardzo szybko wzrasta.

Nadmienić jednak należy, że dalszy dynamiczny rozwój sprzętu komputerowego stwarza coraz to nowe możliwości. Być może w najbliższym czasie możliwe będzie przeprowadzanie wymienionych analiz przekątności oraz jednoznaczności kierunków przepływu w całych sieciach wentylacyjnych istniejących kopalń. Nie zwalnia to jednak z obowiązku pracy nad dalszymi, bardziej efektywnymi algorytmami badania jednoznaczności kierunków przepływu powietrza w kopalni. Zagadnienie to będzie przedmiotem analizy w następnych rozdziałach.

Przykład z bocznicą źródłową usytuowaną poza bocznicą zamykającą podany będzie w dalszej części pracy.

2.8.3. Bocznice normalne i przekątne w acyklicznych zredukowanych sieciach płaskich

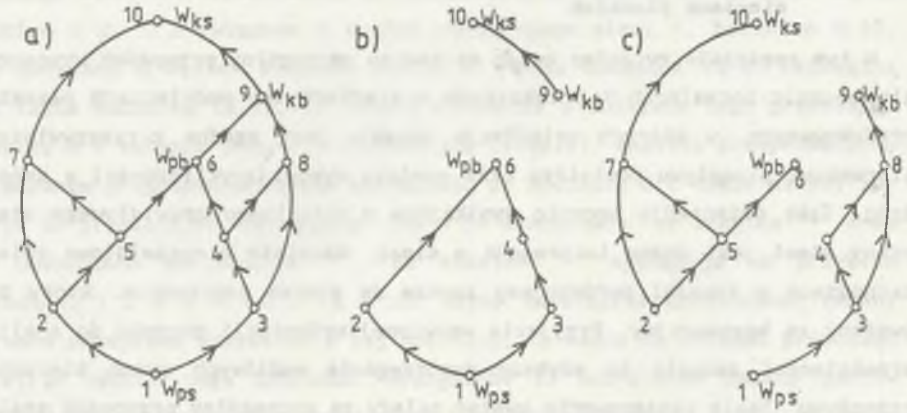
W tym rozdziale zwrócimy uwagę na pewien szczególny przypadek wyznaczania bocznic normalnych i przekątnych w sieciach lub podsieciach płaskich zredukowanych, w których orientacja bocznic jest zgodna z rzeczywistymi kierunkami przepływu powietrza oraz spełnia wymogi acykliczności w sensie dróg. Taka orientacja bocznic wynikająca z aktualnego prawidłowego stanu pracy sieci jest ważną informacją o sieci. Wszelkie nieprawidłowe zmiany zachodzące w kopalni porównujemy zawsze ze stanem poprzednim, który był uważany za bezawaryjny. Przyjęcie omówionej orientacji bocznic do analizy przekątności zezwala na szybsze dostrzeganie możliwych zmian kierunków przepływu. Takie postępowanie uważać należy za szczególny przypadek analiz przekątności przeprowadzanych także przy założeniu ogólniejszym, gdy zakłada się, że nie są znane aktualne kierunki przepływu. Dla praktyki, zdaniem autora, przydatne są obydwa sposoby podejścia do zagadnienia, tzn. takie, w których zakłada się znajomość aktualnych kierunków przepływu oraz gdy nie czyni się tego założenia.

Przedstawiony dalej w niniejszym rozdziale wniosek o charakterze bocznic w sieciach zredukowanych płaskich, zorientowanych w sposób acykliczny, uważać należy za szczególny przypadek wynikający już z wcześniejszych badań Simode'a [112]. Wniosek ten zdaniem autora wymaga jednak ponownego pokazania przy przyjętych w tym rozdziale założeniach o orientacji bocznic.

Istnienie wymienionej klasy sieci zredukowanych płaskich rozważane było w rozdziale 2.6, gdzie omówiono metodę i algorytm wyszukiwania podsieci prowadzący do wyznaczenia struktury sieci zredukowanej, a także w rozdziale 2.7, gdzie omówiono metodę i algorytm sprawdzający planarność sieci. W rozdziałach tych przyjęto jako obowiązujące założenie o orientacji bocz-

nic spełniającej wymogi o acykliczności sieci w sensie dróg. Założenie to w tym rozdziale będzie dalej utrzymane. W takim przypadku definicje bocznicy normalnej i przekątnej mogą być zmodyfikowane.

Modyfikacja definicji podanych przez Simode'a [112], a omówionych w rozdziale 2.8.1, dotyczyć będzie pierwszego warunku w tych definicjach, wymagającego istnienia rozłącznych łańcuchów R~>X, Y~>A (rys. 2.8.1a). W sieciach acyklicznych w sensie dróg warunki te zawsze są spełnione, ponieważ z każdego węzła Y istnieje nie tylko łańcuch Y~>A, lecz nawet droga do węzła końcowego sieci $A = w_{ks}$, a także z węzła początkowego sieci $R = w_{ps}$ istnieje nie tylko łańcuch R~>X, lecz nawet droga do każdego węzła sieci. Drogi te są rozłączne, ponieważ inaczej sieć nie byłaby acykliczna.



Rys.2.8.3. Przykłady dróg $w_{ps} \rightarrow w_{pb}$, $w_{kb} \rightarrow w_{ks}$ (b) oraz łańcuchów $w_{ps} \sim> w_{kb}$, $w_{pb} \sim> w_{ks}$ (c) związanych z bocznicą przekątną 6 9 w sieci (a)

Fig. 2.8.3. Examples of the paths $w_{ps} \rightarrow w_{pb}$, $w_{kb} \rightarrow w_{ks}$ (b) and the chains $w_{ps} \sim> w_{kb}$, $w_{pb} \sim> w_{ks}$ (c), connected with the diagonal branch 6 9 in network (a)

Wprowadzimy następujące określenia przydatne także w dalszych rozdziałach:

$\mathcal{D}_{ps,pb}$ - zbiór dróg d_i od węzła początkowego sieci w_{ps} do węzła początkowego w_{pb} bocznicy badanej b_b. W sieci na rys. 2.8.3a,b, gdy bocznicą badaną b_b jest bocznica 6 9, do zbioru tego należą dwie drogi, tzn. 1 2 5 6, 1 3 4 6,

$\mathcal{D}_{kb,ks}$ - zbiór dróg d_j od węzła końcowego w_{kb} bocznicy badanej do węzła końcowego sieci w_{ks}. W sieci na rys. 2.8.3a,b istnieje jedna taka droga, w tym przypadku jest to bocznica 9 10.

Rozłączność dróg $d_i \in \mathcal{D}_{ps,pb}$, $d_j \in \mathcal{D}_{kb,ks}$ w sposób formalny można zapisać następująco:

$$\bigwedge_{d_i,d_j} d_i \cap d_j = \emptyset \qquad (2.8.3.1)$$

Przydatne jest także posługiwanie się zbiorami odpowiednich łańcuchów $\mathcal{L}$:

$\mathcal{L}_{ps,kb}$ - zbiór łańcuchów ℓ_i od węzła początkowego sieci w_{ps} do węzła końcowego w_{kb} bocznicy badanej b_b nie zawierających węzłów początkowego w_{pb} bocznicy badanej i końcowego sieci w_{ks}. W sieci na rys. 2.8.3a,c od węzła 1 do węzła 9 występują dwa takie łańcuchy 1 3 8 9, 1 3 4 8 9 (w tym przypadku łańcuchy te są także drogami),

$\mathcal{L}_{pb,ks}$ - zbiór łańcuchów ℓ_j od węzła początkowego w_{pb} bocznicy badanej do węzła końcowego sieci w_{ks}, nie zawierających węzłów końcowego w_{kb} badanej bocznicy i początkowego sieci w_{ps}. W sieci na rys. 2.8.3a,c od węzła 6 do węzła 10 występują dwa takie łańcuchy: 6 -5 7 10, 6 -5 -2 7 10.

Ponieważ w sieci acyklicznej w sensie dróg pierwsze warunki w definicjach bocznicy przekątnej i normalnej są zawsze spełnione, o charakterze danej bocznicy w takiej sieci można rozstrzygać analizując tylko drugie warunki w tych definicjach. Posługując się wprowadzonymi określeniami warunki te można sprecyzować w sposób następujący:

- w sieci acyklicznej w sensie dróg bocznica jest przekątna, gdy istnieją dwa rozłączne łańcuchy $\ell_i \in \mathcal{L}_{ps,kb}$, $\ell_j \in \mathcal{L}_{pb,ks}$, tzn.

$$\bigvee_{\ell_i,\ell_j} \ell_i \cap \ell_j = \emptyset \qquad (2.8.3.2)$$

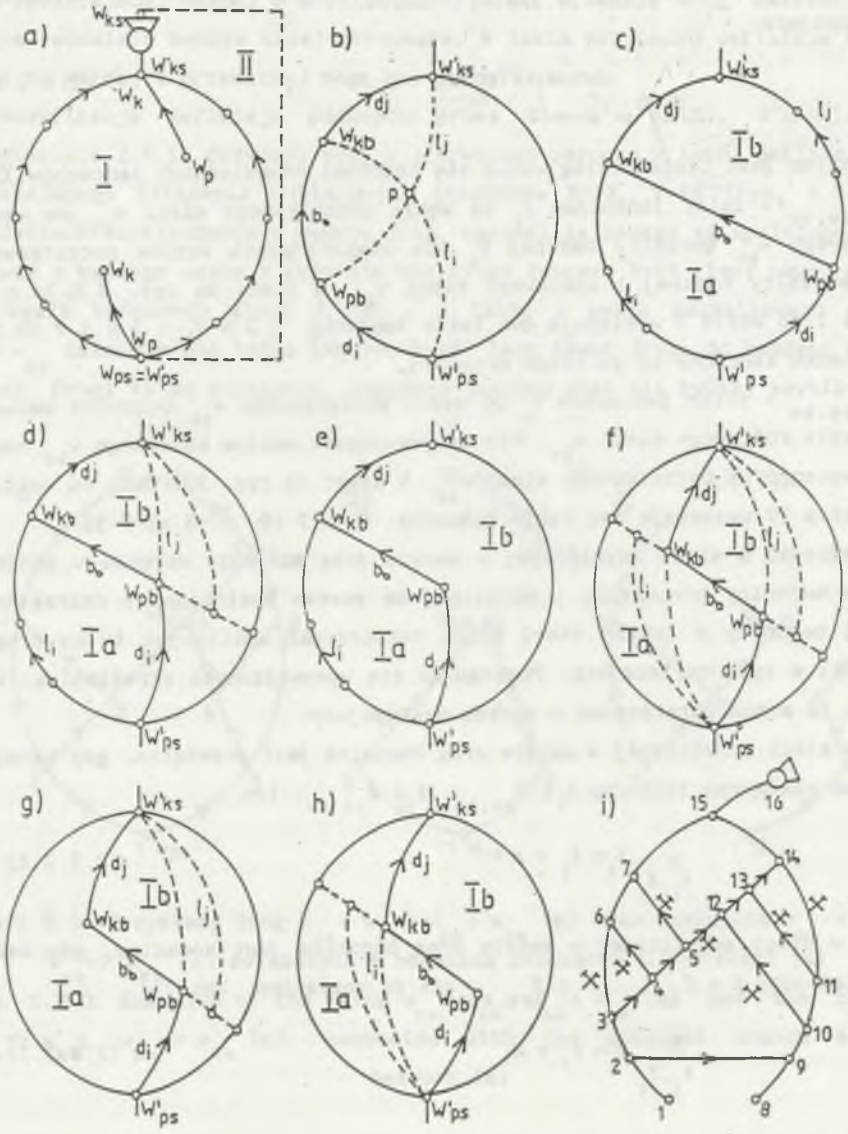
- w sieci acyklicznej w sensie dróg bocznica jest normalna, gdy każde dwa łańcuchy $\ell_i \in \mathcal{L}_{ps,kb}$, $\ell_j \in \mathcal{L}_{pb,ks}$ nie są rozłączne, tzn.

$$\bigwedge_{\ell_i,\ell_j} \ell_i \cap \ell_j \neq \emptyset \qquad (2.8.3.3)$$

Przedstawione modyfikacje wymienionych warunków są słuszne także w niepłaskiej sieci acyklicznej w sensie dróg, co będzie przedmiotem analizy w dalszych rozdziałach.

W sieci zredukowanej płaskiej można wyróżnić (rys. 2.8.4a):

- bocznicę zamykającą w_{ps} w_{ks}. Niekiedy istnieją także bocznice połączone szeregowo z bocznicą zamykającą. Występują one w przypadku, gdy w sieci istnieje jeden wlot z atmosfery lub jeden wylot do atmosfery. Taki szeregowy ciąg bocznic można wtedy zastąpić jedną bocznicą zamykającą zastępczą o węzłach krańcowych w'_{ks}, w'_{ps} (rys. 2.8.4a),



Rys. 2.8.4. Ilustracje do wniosku o bocznicach normalnych i przekątnych w acyklicznej zredukowanej sieci płaskiej

Fig. 2.8.4. Illustrations to the conclusion concerning normal and diagonal branches in an acyclic reduced flat network

- dokładnie dwie drogi $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$, które po odrzuceniu bocznicy zamykającej zastępczej rozdzielają płaszczyznę na dwie części wewnętrzną I i zewnętrzną II (rys. 2.8.4a). Drogi te wyznaczane są w ostatnim etapie

sprawdzania planarności sieci (rozdz. 2.7.3, 2.7.4, rys. 2.7.6, 2.7.7). Będziemy je nazywać drogami zewnętrznymi $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$.

W takiej sytuacji wszystkie bocznice sieci (z wyjątkiem bocznicy zamykającej zastępczej) można rozdzielić na dwie grupy (rys. 2.8.4a):

- bocznice incydentne z węzłami w'_{ps}, w'_{ks} oraz należące do dwu dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$,
- pozostałe bocznice (leżą one w części wewnętrznej I płaszczyzny).

Wniosek, który sformułował Simode [112], o podziale bocznic na normalne i przekątne w sieci płaskiej niezorientowanej, w przypadku gdy bocznicom nadamy orientację zgodną z wymogami o acykliczności w sensie dróg oraz przeprowadzimy redukcję sieci, można ująć w sposób następujący: w sieci płaskiej i acyklicznej bocznicami normalnymi są jedynie bocznice incydentne z węzłami w'_{ps}, w'_{ks} oraz należące do dwu dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ (rys. 2.8.4a).

Uzasadnienie tego wniosku przeprowadzone w nieco inny sposób niż w pracy [112] jest następujące. Normalny charakter bocznic, których węzłem końcowym jest w'_{ks} (rys. 2.8.4a) wynika z nieistnienia łańcucha $w_{pb} \rightsquigarrow w_{ks}$ nie przechodzącego przez $w_{kb} = w'_{ks}$. Nie jest więc spełniony warunek (2.8.3.2). Podobnie dla bocznic, dla których węzłem początkowym jest w_{ps} lub w'_{ps}. Nie istnieje wtedy łańcuch $w_{ps} \rightsquigarrow w_{kb}$, nie przechodzący przez $w_{pb} = w'_{ps}$.

Dla dowolnej bocznicy $w_{pb}\, w_{kb}$ należącej do drogi zewnętrznej $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ (rysunek 2.8.4b) może istnieć dużo łańcuchów $\ell_j = w_{pb} \rightsquigarrow w'_{ks}$, a także $\ell_i = w'_{ps} \rightsquigarrow w_{kb}$. Wszystkie te łańcuchy przechodzą przez część I wewnętrzną schematu. Sieć jest płaska, więc każda dowolna para takich łańcuchów ℓ_i, ℓ_j przecina się w jakimś punkcie P (rys. 2.8.4b), co czyni zadość przytoczonej wcześniej zmodyfikowanej definicji bocznicy normalnej (2.8.3.3).

Dla dalszego uzasadnienia przedstawionego wniosku pokażemy, że każda bocznica nie spełniająca wyżej wymienionych założeń, tzn. nie incydentna z węzłem w'_{ps} lub z węzłem w'_{ks}, a także nie należąca do jednej z dwu wymienionych wcześniej dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$, jest bocznicą przekątną. Trzeba więc wykazać istnienie dwu łańcuchów ℓ_i, ℓ_j spełniających warunek (2.8.3.2). Wcześniej wykazano, że w analizowanej klasie sieci istnieją zawsze dwie rozłączne drogi $d_i = w'_{ps} \rightarrow w_{pb}$, $d_j = w_{kb} \rightarrow w'_{ks}$ spełniające warunek (2.8.3.1). W najgorszym przypadku są to drogi jednobocznicowe (rys. 2.8.4, c,d,f). Część wewnętrzna płaszczyzny I (rys. 2.8.4a) ograniczona dwoma drogami zewnętrznymi $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ zostaje wtedy podzielona na dwie części Ia, Ib (rys. 2.8.4c,d,f). Poszukiwane łańcuchy ℓ_i, ℓ_j położone będą każdy w innej części, np. ℓ_i w części Ia, ℓ_j w części Ib.

Ze względu na położenie węzłów początkowego w_{pb} i końcowego w_{kb} badanej bocznicy b_b względem dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ można tu wyróżnić kilka charakterystycznych przypadków pokazanych na rys. 2.8.4c,d,f.

Położenie węzłów początkowego w_{pb} i końcowego w_{kb} badanej bocznicy b_b w dwu różnych drogach zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ (rys. 2.8.4c) powoduje, że poszukiwane łańcuchy ℓ_i, ℓ_j są fragmentami tych dróg i są rozłączne. Spełniony jest więc warunek (2.8.3.2).

Przypadek, gdy węzeł końcowy w_{kb} badanej bocznicy b_b zawarty jest w jednej z dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$, pokazano na rys. 2.8.4d. Łańcuch ℓ_i jest wtedy fragmentem tej drogi. Łańcuch ℓ_j musi wtedy leżeć w części Ib płaszczyzny. Gdyby nie istniał taki łańcuch ℓ_j, to sieć uprościłaby się do postaci pokazanej na rys. 2.8.4e. Jak widać, w sieci występuje wtedy podsieć zawarta między węzłem w'_{ps} a w_{kb}, co przeczy przyjętemu założeniu o sieci zredukowanej.

Uzasadnienie przekątnego charakteru bocznicy w przypadku, gdy węzeł początkowy w_{pb} tej bocznicy leży w jednej z dróg zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$ przeprowadza się w podobny sposób.

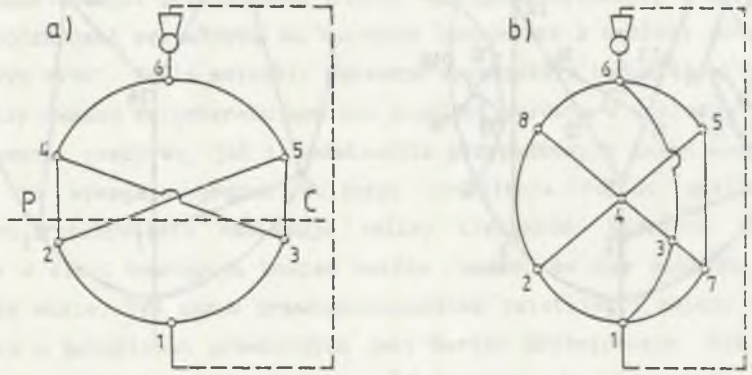
Na rys. 2.8.4f pokazano przypadek, gdy obydwa węzły początkowy w_{pb} i końcowy w_{kb} badanej bocznicy b_b nie są położone w drogach zewnętrznych $w'_{ps} \rightarrow w'_{ks}$. Istnieją wtedy rozłączne łańcuchy: ℓ_i - położony w części Ia płaszczyzny, ℓ_j - w części Ib płaszczyzny. Gdyby nie istniał np. łańcuch ℓ_i, to sieć uprościłaby się do postaci pokazanej na rys. 2.8.4g. Istnieje wtedy bocznica w_{ps} w_{ks} oraz równolegle do tej bocznicy podsieć między wymienionymi węzłami, co przeczy przyjętemu założeniu o sieci zredukowanej. Gdy nie istnieje łańcuch ℓ_j, to sieć z rys. 2.8.4f upraszcza się do postaci pokazanej na rys. 2.8.4h. Wyciąga się stąd podobny wniosek co poprzednio.

Przedstawione uwagi o charakterze bocznic w sieciach zredukowanych płaskich pokrywają się z wynikami analiz przekątności bocznic przedstawionymi w innych pracach. Wyraźnie widać to np. na schemacie kanonicznym (rysunek 2.8.4i), który był analizowany innymi metodami w pracy [25].

2.8.4. Przekątność bocznic w sieciach niepłaskich

Przedstawione w poprzednim rozdziale wnioski o charakterze bocznic w sieciach zredukowanych płaskich nie mogą być przeniesione na wszystkie sieci niepłaskie. W wielu pracach podkreśla się złożoność zagadnienia przekątności bocznic właśnie w sieciach niepłaskich. Często podawany jest przykład z rys. 2.8.5a, gdzie nieplanarność sieci powoduje, że jedynymi

bocznicami normalnymi są bocznice incydentne z węzłem początkowym w_{ps} i końcowym w_{ks} sieci. Nie istnieje wtedy droga $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$, w której wszystkie bocznice byłyby normalne, a tym samym istnieje przekrój całkowity przez sieć P-C (rys. 2.8.5a), w którym wszystkie bocznice są przekątne. Za stosowne uznano przypomnienie tego faktu, ponieważ przy rysowaniu schematu kanonicznego sieci niepłaskich (na przykład na zajęciach dydaktycznych) bocznice należące do dwu dróg ograniczających rysunek w płaszczyźnie, przez analogię do sieci płaskich, często traktowane są jako bocznice normalne, co nie zawsze jest prawdziwe.



Rys. 2.8.5. Przykłady bocznic przekątnych i normalnych w sieciach niepłaskich

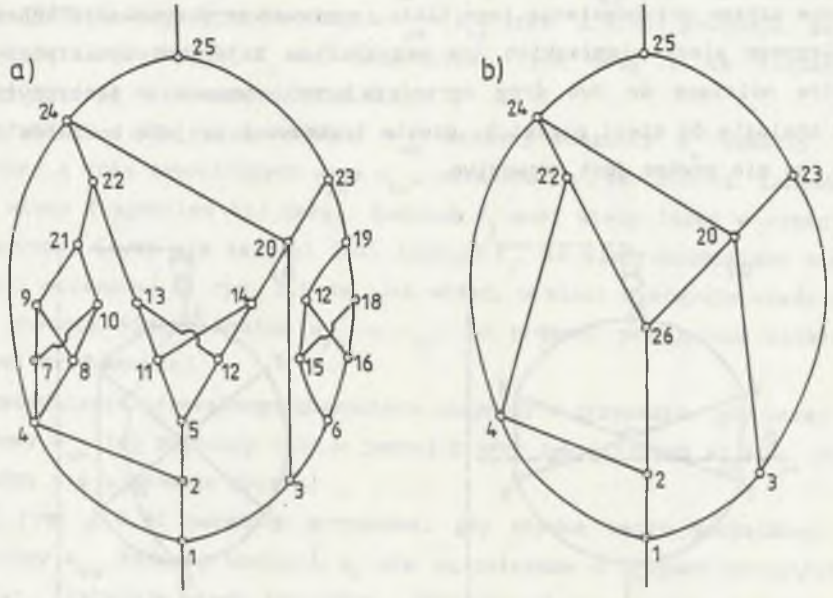
Fig. 2.8.5. Example of diagonal and normal branches in not-flat networks

Duża liczba bocznic przekątnych w sieciach niepłaskich wynika z możliwości powstawania łańcuchów $\ell_i \in \mathcal{L}_{ps,kb}$, $\ell_j \in \mathcal{L}_{pb,ks}$ poza jedną płaszczyzną oraz nieprzecinania się tych łańcuchów właśnie ze względu na przestrzenną budowę sieci. Występują jednak szczególne przypadki sieci niepłaskich, w których oprócz bocznic incydentnych z węzłami początkowym i końcowym sieci występują jeszcze inne bocznice normalne. Zagadnienie to było także przedmiotem analizy w pracy Simode'a [112]. Ważność uzyskanych wyników uzasadnia celowość ich przypomnienia.

W pracy [112] oprócz sieci planarnych wyróżnia się także sieci pseudoplanarne, to jest takie, które stają się planarne po redukcji. Redukcja struktury sieci proponowana przez Simode'a jest szersza niż to przedstawiono w niniejszej pracy w rozdziale 2.6. Obejmuje ona:

- wydzielenie fragmentów sieci posiadających dokładnie dwa węzły wspólne z resztą sieci i zastąpienie każdego fragmentu jedną bocznicą (rys. 2.8.6a,b),

- wydzielenie fragmentów sieci posiadających dokładnie trzy węzły wspólne z resztą sieci i zastąpienie każdego takiego fragmentu gwiazdą (rys. 2.8.6a,b).



Rys. 2.8.6. Sieć niepłaska (a) przechodząca po redukcji podsieci i fragmentów zastępowalnych gwiazdą w sieć płaską (b)

Fig. 2.8.6. Not-flat network (a), after the reduction of the sub-network and fragments replaceable by an star passing over into a flat network (b)

Nadmienić należy, że Simode nie podaje algorytmów, które umożliwiłyby opracowanie programów komputerowych realizujących taką redukcję. Jeżeli sieć niepłaska po wykonaniu redukcji staje się siecią płaską (rys. 2.8.6b), to słuszne są wcześniej przedstawione wnioski co do charakteru bocznic w sieci zredukowanej płaskiej. Niepłaskość występująca w podsieciach lub w fragmentach, które zastępowane są gwiazdą, nie wpływa więc na planarność lub nieplanarność sieci zredukowanej. Na rysunku 2.8.6b w sieci zredukowanej występują dwie drogi, w których wszystkie bocznice są normalne. Simode [112] podaje też warunki co do charakteru bocznic występujących w wydzielonych fragmentach sieci.

W niepłaskich sieciach zredukowanych także mogą występować bocznice normalne [112]. Ma to miejsce wtedy, gdy wszystkie łańcuchy $\ell_i \in \mathcal{L}_{ps,kb}$, $\ell_j \in \mathcal{L}_{pb,ks}$ przechodzą przez jeden węzeł nazywany przez Simode'a punktem przecięcia. Jest wtedy spełniony warunek (2.8.3.3). W sieci na rys. 2.8.5b taką bocznicą jest bocznica 2 8. Wszystkie łańcuchy ℓ_i od węzła 1 do węzła

8 oraz wszystkie łańcuchy ℓ_j od węzła 2 do węzła 6 przecinają się w węźle 4. Przy jedynym źródle ruchu powietrza w sieci (wentylator w bocznicy 6 1) nie jest więc możliwe uzyskanie przepływu odwróconego w tej bocznicy. Bocznica 7 5 (rys. 2.8.5b) jest natomiast przekątna, ponieważ łańcuchy 1 2 4 5 oraz 7 3 6 nie przecinają się.

Przedstawione dotychczas przykłady analizy przekątności, w których przyjęto definicję charakteru bocznicy wykorzystującą właściwości struktury sieci oraz badania przekątności w większych rzeczywistych podsieciach wskazują, że w sieciach tych ze względu na ich nieplanarność występuje bardzo dużo bocznic przekątnych. Często występują sytuacje, w których jedynymi bocznicami normalnymi są bocznice incydentne z węzłami początkowym i końcowym sieci. Takie wnioski, uzyskane wyłącznie z badań struktury sieci, należy uważać za interesujące dla praktyki zarówno w zakresie celowego kształtowania rozpływu, jak i powstawania przypadkowych zmian awaryjnych. Badania te wymagają jednak dalszego uściślenia co do okoliczności, w których rzeczywiście następują zmiany kierunków. Niektóre zdarzenia awaryjne w sieci występują bowiem bardzo rzadko, co nie oznacza, że nie występują wcale. Tym samym prawdopodobieństwo zaistnienia zmiany kierunku przepływu w bocznicach przekątnych jest bardzo zróżnicowane. Dla niektórych bocznic jest duże, dla wielu bocznic bardzo małe.

W badaniach kopalnianej sieci wentylacyjnej coraz częściej korzysta się więc z teorii niezawodności pracy systemów, co stanowi dalsze korzystne dla bezpieczeństwa pracy uzupełnienie i rozwinięcie dotychczasowych badań struktury sieci. Znane wskaźniki oceny trwałości kierunków przepływu powinny także uwzględniać losowy charakter zdarzeń występujących w kopalni, co powinno być przedmiotem dalszych badań.

Duża liczba bocznic przekątnych w sieci stwarza także spore możliwości wykorzystania pozytywnych właściwości tych prądów w sytuacjach, które wymieniono w rozdz. 2.8.1. Awaryjne wykorzystanie tych możliwości wymaga jednak wcześniejszego sprawdzenia czy wystąpią zaplanowane zmiany kierunków przepływu spowodowane zaplanowanymi zmianami stanu pracy wielu tam wentylacyjnych i tam bezpieczeństwa. W tym zakresie przydatne są symulacyjne obliczenia rozpływu powietrza w sieci. Istotna jest uwaga o rzetelności danych wejściowych wprowadzanych do tych obliczeń.

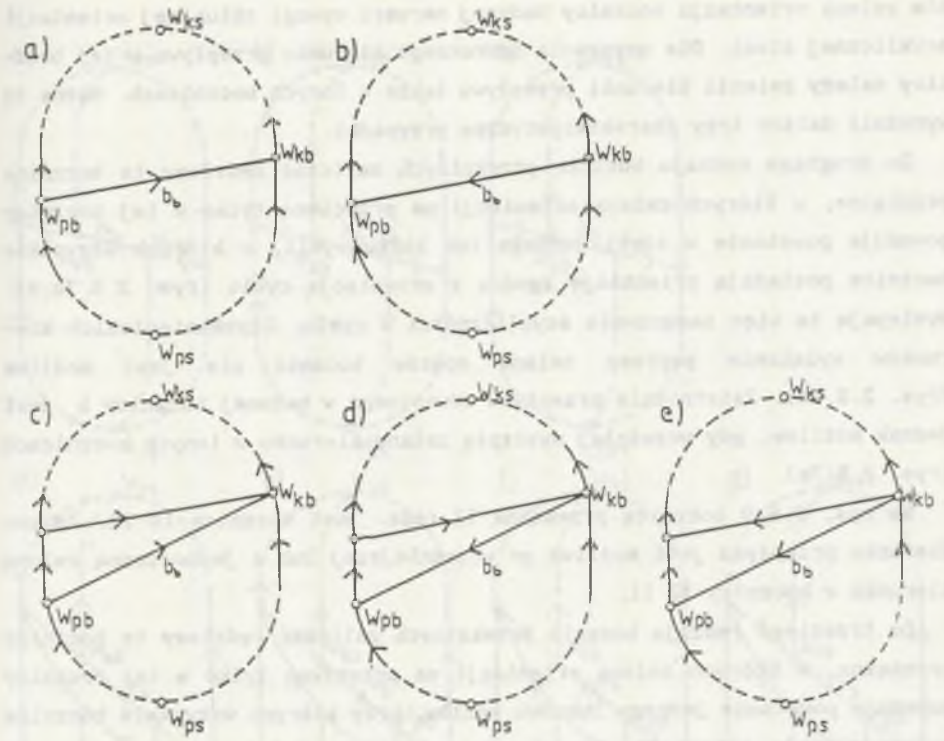
2.8.5. Klasyfikacja bocznic przekątnych ze względu na ich położenie w strukturze sieci

Duża liczba bocznic przekątnych w kopalnianych sieciach wentylacyjnych oraz zróżnicowane prawdopodobieństwo odwracania się prądów powietrza w tych bocznicach skłaniają do bardziej dokładnej analizy tego zagadnienia. Analizę tę można prowadzić pod kątem czynników wymuszających odwrócenia, czyli możliwych zmian oporów bocznic oraz prawdopodobieństwa zachodzenia tych zmian, a także pod kątem występowania odpowiednich dróg i łańcuchów umożliwiających zaistnienie odwrócenia. W tej części pracy, poświęconej opisowi struktury sieci, zwrócimy uwagę na drugi z wymienionych czynników. Przedmiotem rozważań będzie klasyfikacja bocznic przekątnych ze względu na ich położenie w strukturze sieci.

W literaturze znane są różne sposoby klasyfikacji tych bocznic. Sposób podziału uzależniony jest oczywiście od przyjętego kryterium kwalifikującego do odpowiedniej grupy. M. Patruszew i N. Karnauch [95] wyróżniają kilka takich podziałów, a mianowicie ze względu na: znaki prądów powietrza, między którymi występuje bocznica przekątna, "stopień stabilności", miejsce występowania w schemacie technologiczno-wentylacyjnym. W. Schmidt [110] proponuje podział na dwa rodzaje bocznic przekątnych w zależności od lokalizacji tej bocznicy w podsieci jednego wentylatora głównego lub w wyrobisku znajdującym się pod wpływem dwu wentylatorów głównych. Wprowadzone podziały nie wyczerpują wszystkich możliwości klasyfikacji bocznic przekątnych. Przydatne wydaje się wprowadzenie dalszej klasyfikacji wykorzystującej aktualnie panujące w sieci kierunki przepływu powietrza.

Uzasadniono już, że przy pracy wentylatorów głównych oraz przy niewystępowaniu w sieci innych źródeł ruchu powietrza aktualne kierunki przepływu spełniają wymogi grafów zorientowanych w sposób acykliczny w sensie dróg. Możliwość nadawania bocznicy przekątnej orientacji przeciwnej do aktualnej, czyli możliwość uzyskiwania odwróconego kierunku przepływu będzie podstawą zaliczenia bocznicy przekątnej do odpowiedniego rodzaju bocznic przekątnych. Wyróżniać będziemy cztery rodzaje tych bocznic. Przedstawioną klasyfikację przeprowadzić można przy założeniu, że sieć (lub podsieć) jest zredukowana.

Do pierwszego rodzaju bocznic przekątnych zaliczać będziemy te bocznice, dla których zmiana orientacji na przeciwną do aktualnej nie narusza wymogów acyklicznej orientacji sieci w sensie dróg (rys. 2.8.7a,b). Dla



Rys. 2.8.7. Bocznice przekątne b_b I rodz. (a) i b_b II rodz. (c)

Fig. 2.8.7. Diagonal branches b_b of type I (a) and b_b of type II (c)

tych bocznic oprócz istnienia rozłącznych dróg $w_{ps} \rightarrow w_{pb}$, $w_{kb} \rightarrow w_{ks}$ istnieją także nie tylko łańcuchy, lecz dwie rozłączne drogi $w_{ps} \rightarrow w_{kb}$, $w_{pb} \rightarrow w_{ks}$. Bocznice te bardzo łatwo można identyfikować w schemacie sieci oraz w cyfrowym zapisie struktury, ponieważ dla węzłów krańcowych w_p, w_k tej bocznicy spełnione są warunki:

$$l_{pl}(w_p) \geq 2 \qquad l_{ml}(w_k) \geq 2 \qquad osg(w_p, w_k) = 1, \tag{2.8.5.1}$$

gdzie: l_{pl} - liczba bocznic wypływających z węzła,

l_{ml} - liczba bocznic dopływających do węzła.

W schemacie na rys. 2.8.9 bocznicą przekątną I rodzaju jest np. bocznica 8 9. Odpowiednie dwie drogi umożliwiające wystąpienie przepływu odwrotnego są następujące: 1 2 7 9, 8 13. Nie zachodzi potrzeba dokonywania zmian kierunków przepływu w innych bocznicach. Bocznice przekątne wyznaczane przez Müllera w pracy [92] są właśnie bocznicami przekątnymi I rodzaju.

Następne rodzaje bocznic przekątnych charakteryzują się tym, że dokonanie zmiany orientacji bocznicy badanej narusza wymogi aktualnej orientacji acyklicznej sieci. Dla uzyskania odwrotnego kierunku przepływu w tej bocznicy należy zmienić kierunki przepływu także w innych bocznicach. Można tu wyróżnić dalsze trzy charakterystyczne przypadki.

Do drugiego rodzaju bocznic przekątnych zaliczać będziemy te bocznice przekątne, w których zmiana orientacji na przeciwną tylko w tej bocznicy powoduje powstanie w sieci jednego lub kilku cykli, w których wszystkie bocznice posiadają orientację zgodną z orientacją cyklu (rys. 2.8.7c,d). Występuje tu więc naruszenie acykliczności w cyklu. Uzyskanie takich kierunków wyłącznie poprzez zmianę oporów bocznic nie jest możliwe (rys. 2.8.7d). Zaistnienie przepływu odwrotnego w badanej bocznicy b_b jest jednak możliwe, gdy wcześniej wystąpią zmiany kierunku w innych bocznicach (rys. 2.8.7e).

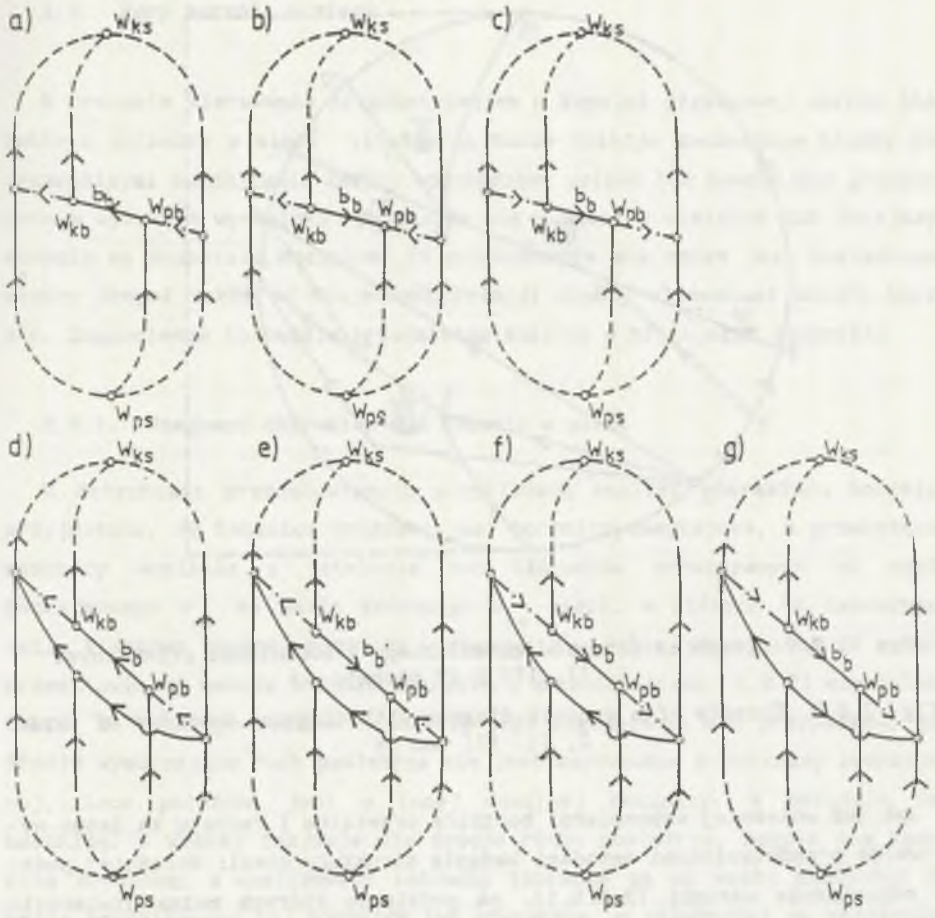
Na rys. 2.8.9 bocznicą przekątną II rodz. jest bocznica 10 12. Zmiana kierunku przepływu jest możliwa po wcześniejszej lub z jednoczesną zmianą kierunku w bocznicy 10 11.

Do trzeciego rodzaju bocznic przekątnych zaliczać będziemy te bocznice przekątne, w których zmiana orientacji na przeciwną tylko w tej bocznicy powoduje powstanie jednego lub dwu węzłów, przy których wszystkie bocznice będą posiadały orientację do lub od węzła (rys. 2.8.8a,b). Występuje tu więc naruszenie zgodności orientacji przy węzłach. Podobnie jak poprzednio, takie kierunki przepływu nie są możliwe (rys. 2.8.8b). Dla uzyskania odwrotnego przepływu w badanej bocznicy muszą więc wystąpić wcześniej lub jednocześnie zmiany kierunków w innych bocznicach (rys. 2.8.8c).

Na rys. 2.8.9 bocznicą przekątną III rodzaju jest bocznica 9 10. Odwrócenie jest możliwe, gdy wcześniej lub jednocześnie nastąpią zmiany kierunków w bocznicach 10 11 i 8 9.

Czwarty rodzaj bocznic przekątnych to takie, w których zmiana orientacji na przeciwną tylko w tej bocznicy powoduje naruszenie acyklicznej orientacji sieci zarówno w niektórych cyklach, jak i przy węzłach (rys. 2.8.8d,e). Uzyskanie odwrotnego kierunku przepływu możliwe jest po wcześniejszej lub z jednoczesną zmianą kierunku w innych bocznicach (rys. 2.8.8g).

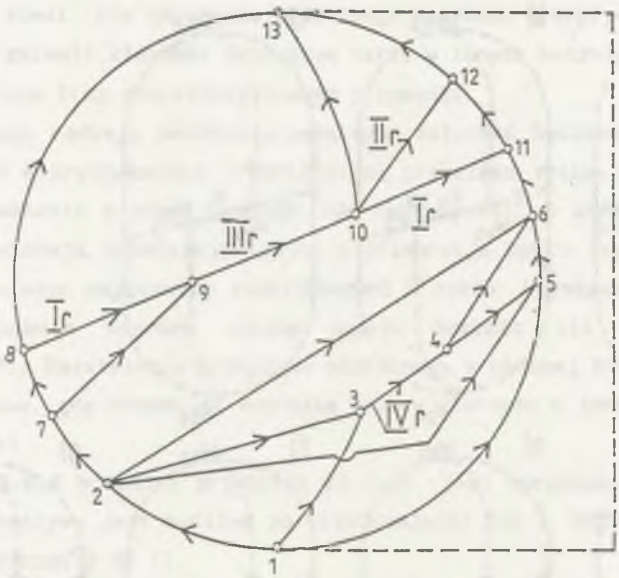
Na rys. 2.8.9 bocznicą przekątną IV rodz. jest bocznica 3 4. Przepływ odwrotny od węzła 4 do węzła 3 jest możliwy po zmianie kierunku w bocznicach 4 5 i 2 3. Musi wystąpić także zmiana kierunku przepływu w bocznicy 2 5.



Rys. 2.8.8. Bocznice przekątne b_b III rodz. (a) i IV rodz. (d)
Fig. 2.8.8. Diagonal branches b_b of type III (a) and b_b of type IV (d)

Zaistnienie zmiany kierunku przepływu w bocznicach przekątnych II, III i IV rodzaju wiąże się więc ze zmianami kierunków w pewnym fragmencie sieci. Przypuszczać można, że potrzebne zmiany oporów bocznic powodujące takie zmiany kierunków są duże. Czasami zachodzi potrzeba zaistnienia zmian kilku oporów. Zagadnienie to powinno być przedmiotem dalszych badań.

W trakcie prowadzenia badań w czasie obliczeń symulacyjnych rozpływu powietrza przy stopniowo zmienianych oporach bocznic zauważono, że w pierwszej kolejności zmiany kierunków występują właśnie w bocznicach przekątnych I rodzaju. W bocznicach przekątnych wyższego rodzaju odwrócenie występuje dopiero po wcześniejszej zmianie kierunku w przekątnych I rodzaju.



Rys. 2.8.9. Przykład schematu kanonicznego z bocznicami przekątnymi I, II, III i IV rodzaju

Fig. 2.8.9. Example of a canonic diagram with diagonal branches of type I, II, III and IV

Jak już wcześniej wspomniano, bocznice przekątne I rodzaju są łatwo wykrywalne przedstawionymi metodami badania struktury sieci. Wcześniej podano odpowiednie warunki (2.8.5.1), na podstawie których można stwierdzić przynależność bocznicy do tej grupy. Zadania te realizuje odpowiedni podprogram, będący fragmentem programu analizującego strukturę sieci. Na podstawie analizy liczb $l_{pl}(w_p)$, $l_{ml}(w_k)$, $osg(w_p,w_k)$ związanych z węzłami początkowym w_p i końcowym w_k każdej bocznicy można rozstrzygnąć o przynależności danej bocznicy do bocznic przekątnych I rodzaju.

Przeprowadzone badania wybranych dużych sieci wentylacyjnych kopalń węgla pozwalają na stwierdzenie, że około 20% bocznic w tych sieciach to bocznice przekątne I rodzaju.

2.9. Pary bocznic w sieci

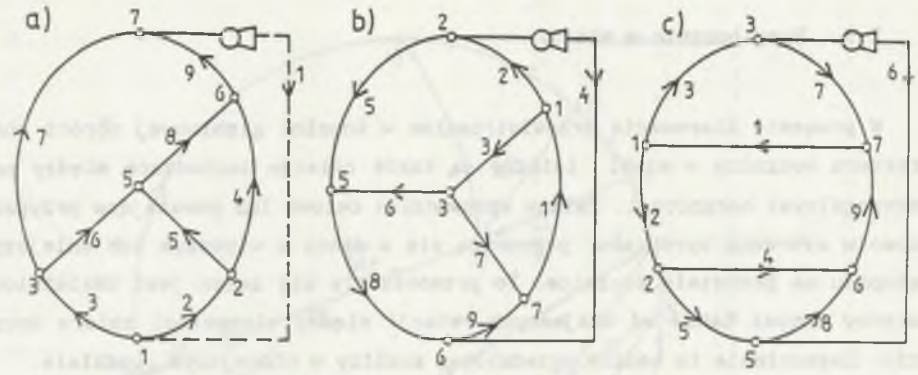
W procesie kierowania przewietrzaniem w kopalni głębinowej oprócz charakteru bocznicy w sieci istotne są także relacje zachodzące między poszczególnymi bocznicami. Zmiany wprowadzane celowo lub powstające przypadkowo w wybranym wyrobisku przenoszą się w sieci w większym lub mniejszym stopniu na pozostałe bocznice. To przenoszenie się zmian jest uzależnione między innymi także od wzajemnych relacji między elementami zbioru bocznic. Zagadnienie to będzie przedmiotem analizy w niniejszym rozdziale.

2.9.1. Wzajemny charakter dwu bocznic w sieci

W dotychczas przedstawionych przykładach analizy charakteru bocznicy przyjmowano, że bocznicą źródłową jest bocznica zamykająca, a przekątność bocznicy wynikała z istnienia dwu łańcuchów prowadzonych od węzła początkowego w_{ps} do węzła końcowego w_{ks} sieci, w których to łańcuchach węzły krańcowe badanej bocznicy występowały w różnej kolejności. W opisie przedstawionej metody badania charakteru bocznic (rozdz. 2.8.2) wspomniano także, że istnieje możliwość analizy tego zagadnienia dla przypadków, gdy źródło wymuszające ruch powietrza nie jest usytuowane w bocznicy zamykającej, lecz położone jest w innej dowolnej bocznicy. W metodzie tej bocznicę, w której znajduje się źródło ruchu powietrza, nazywa się bocznicą źródłową, a analizowane łańcuchy tworzone są od węzła końcowego do węzła początkowego tej bocznicy lub odwrotnie, w zależności od założonego kierunku wymuszania przepływu.

Wiadomo także, że istnienie w sieci kilku źródeł ruchu powietrza powoduje powstawanie dalszych niejednoznaczności co do kierunków przepływu. Analiza tego ważnego zagadnienia w niniejszej pracy znacznie rozszerzyłaby jej zakres i objętość. Dlatego też ze względu na duże znaczenie dla praktyki (np. praca wentylatorów pomocniczych) zagadnienie to powinno być przedmiotem dalszych odrębnych prac badawczych.

W następnych rozdziałach pracy przy analizie wrażliwości prądów powietrza na zmiany oporów bocznic potrzebne jednak będą informacje o charakterze bocznic w sytuacjach, gdy źródło wymuszające przepływ (niekoniecznie powietrza) znajduje się w dowolnej bocznicy. Dlatego też dalej przedstawimy kilka uwag w tym zakresie.



Rys. 2.9.1. Bocznice normalne i przekątne gdy bocznicą źródłową jest bocznica 1 (a), bocznica 4 (b), bocznica 6 (c)

Fig. 2.9.1. Normal and diagonal branches, the source branches being branch 1 (a), branch 4 (b), branch 6 (c)

W tabeli 2.9.1 zestawiono wyniki analizy charakteru bocznic w sieci z rys. 2.9.1a uzyskane przedstawioną wcześniej metodą (rozdz. 2.8.2) przy założeniu, że bocznicą źródłową jest kolejno bocznica o numerze od 1 do 9. Orientację bocznic przyjmowano zawsze jednakową, to jest taką jak na rys. 2.9.1a. Kolejne kolumny tej tabeli-macierzy pokazują więc charakter poszczególnych bocznic, gdy źródłowa jest bocznica o numerze odpowiadającym numerowi kolumny.

Pierwsza kolumna dotyczy sytuacji, gdy bocznicą źródłową jest bocznica zamykająca 7 1 (rys. 2.8.1a). Uzyskane w tej kolumnie wyniki są oczywiście identyczne z pokazanymi dla tego samego schematu w tabeli 2.8.2. Analiza właściwości tej tabeli-macierzy prowadzi do wniosku o jej symetrii względem głównej przekątnej. Charakter bocznicy i-tej względem źródłowej j-tej jest taki sam jak bocznicy j-tej względem źródłowej i-tej. Pokazano to także na rysunkach 2.9.1b,c, które są przykładami przekształconych schematów kanonicznych sieci z rys. 2.9.1a. Schematy te narysowano uwypuklając znaczenie bocznicy źródłowej 4 (rys. 2.9.1b), oraz 6 (rys. 2.9.1c). Strzałki na łukach oznaczają pierwotną orientację bocznic przyjętą na rys. 2.9.1a. Bocznica 4 względem źródłowej 1 jest normalna (rys. 2.9.1a), a także na odwrót (rys. 2.9.1b). Bocznica 6 jest przekątna, gdy źródłowa jest bocznica 4 (rys. 2.9.1b), a także bocznica 4 jest przekątna, gdy źródłowa jest bocznica 6 (rys. 2.9.1c). Wynika to z istnienia łańcuchów (rys. 2.9.1b; podajemy je według numerów węzłów): 6 7 3 5 2, 6 5 3 1 2, w których węzły krańcowe 3 5 bocznicy 6 występują w kolejności 3 5 oraz

Tabela 2.9.1

Macierz wzajemnego charakteru par bocznic w sieci z rys. 2.9.1

Bocznice sieci		Bocznica przyjęta za źródłową								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
nr	w_p w_k	7 1	1 2	1 3	2 6	2 5	3 5	3 7	5 6	6 7
1	7 1	źr	nz	nz	nz	p	p	nz	p	nz
2	1 2	nz	źr	np	nz	nz	np	p	p	nz
3	1 3	nz	np	źr	p	np	nz	nz	p	p
4	2 6	nz	nz	p	źr	np	p	p	np	nz
5	2 5	p	nz	np	np	źr	np	p	nz	p
6	3 5	p	np	nz	p	np	źr	np	nz	nz
7	3 7	nz	p	nz	p	p	np	źr	np	np
8	5 6	p	p	p	np	nz	nz	np	źr	nz
9	6 7	nz	nz	p	nz	p	nz	np	nz	źr

źr - bocznica źródłowa,
nz - bocznica normalna o orientacji zgodnej z bocznicą źródłową,
np - bocznica normalna o orientacji przeciwnej do bocznicy źródłowej,
p - bocznica przekątna względem bocznicy źródłowej.

przestawionej 5 3. Istnienie tych łańcuchów jest równoważne z istnieniem łańcuchów (rys. 2.9.1c): 5 2 6 7 3, 5 6 2 1 3, w których węzły krańcowe 2 6 bocznicy 4 występują w kolejności 2 6 oraz przestawionej 6 2. Bocznica 4 o węzłach krańcowych 2 6 jest więc przekątna, gdy źródłowa jest bocznica 6 (rys. 2.9.1c). O takiej względnej (wzajemnej) przekątności dwu bocznic możemy więc mówić, gdy istnieją dwa cykle, w których jedna z bocznic występuje w obydwu cyklach ze znakiem dodatnim, a druga w tych cyklach występuje z różnymi znakami. Dla pary bocznic 4 i 6 cykle te są następujące (według numerów węzłów, rys. 2.9.1a): 6 7 -3 5 -2 6, 6 -5 -3 -1 2 6.

Cechą przeciwną do względnej (wzajemnej) przekątności pary bocznic, wynikającą także z położenia tych bocznic w sieci, jest względna (wzajemna) normalność pary bocznic. Przez zaprzeczenie do względnej przekątności definicję względnej normalności pary bocznic można sprecyzować następująco: dwie bocznice w sieci względem siebie są położone normalnie, gdy nie ist-

nieją dwa cykle, w których jedna z bocznic w obydwu cyklach występuje ze znakiem dodatnim, a druga w tych cyklach występuje z różnymi znakami. Przykładem takich par w analizowanym schemacie jest para bocznic 4 i 1 (rys. 2.9.1a,b), para 6 i 9 (rys. 2.9.1.a,c) oraz para bocznic 6 i 2 (rys. 2.9.1a,c). Można tu dalej wyróżnić dwa charakterystyczne przypadki:

- we wszystkich cyklach wspólnych obydwie bocznice posiadają zawsze takie same znaki. Będziemy wtedy mówić, że orientacja tych bocznic względem siebie jest zgodna. Taką właściwość posiada para bocznic 4 i 1 (rys. 2.9.1a,c) a także para bocznic 6 i 9 (rys. 2.9.1a,c),

- we wszystkich cyklach wspólnych obydwie bocznice posiadają zawsze znaki przeciwne. Będziemy wtedy mówić, że orientacja tych bocznic względem siebie jest przeciwna. Taką właściwość posiada na przykład para bocznic 6 i 2 (rys. 2.9.1c) oraz para bocznic 3 i 5 (rys. 2.9.1c).

W literaturze podawane są różne sposoby klasyfikacji połączeń bocznic lub elementów sieci. W klasyfikacjach tych stosuje się występowanie określonej relacji między bocznicami lub elementami sieci, przy czym najczęściej przyjmuje się, że elementy są ze sobą połączone, gdy posiadają co najmniej jeden wspólny węzeł. Istnienie wspólnego węzła nie jest jedynym sposobem klasyfikacji par bocznic. Inny sposób, to przedstawiona wyżej klasyfikacja uwzględniająca relacje zachodzące między bocznicami w cyklach. Można także definiować i wykorzystywać inne relacje dla par bocznic, na przykład charakterystyczne przypadki występowania danej pary w łańcuchach $w_{ps} \sim> w_{ks}$.

Przedstawiony przykład (rys. 2.9.1) to sieć zredukowana płaska. Dla takiej sieci wniosek przedstawiony w rozdziale 2.8.3 o charakterze bocznic względem wyróżnionej bocznicy źródłowej może być uogólniony dla przypadków dowolnego położenia tej bocznicy źródłowej w sieci. Wynika to także z dołączonej tabeli 2.9.1. W sieci zredukowanej płaskiej przy dowolnym położeniu bocznicy źródłowej jedynymi bocznicami normalnymi względem źródłowej są bocznice incydentne z węzłami krańcowymi źródłowej oraz należące do dwu niezależnych cykli-komórek, w których występuje źródłowa. Ilustrują to rysunki 2.9.1a,b,c. Na przykład, gdy bocznicą źródłową jest bocznica 6, to normalne względem niej są bocznice 5, 2, 3 oraz 8, 9 i 7 (rys. 2.9.1a,c).

2.9.2. Bocznice quasi-równoległe i quasi-szeregowe w acyklicznej sieci zredukowanej

Na zbiorze bocznic kopalnianej sieci wentylacyjnej mogą być określone różne relacje. Jedną z takich relacji - wzajemny charakter dwu bocznic - omówiono w poprzednim rozdziale. Przy określaniu relacji ważne jest sprecyzowanie, jaka cecha danej pary ma być wyróżniona. Znana jest relacja połączenia dwu bocznic zachodząca wtedy, gdy bocznice te posiadają wspólny węzeł. Dalsze uszczegółowienie tej relacji pozwala na wyróżnienie rodzaju połączeń. W pracy [121] z uwagi na możliwość obliczania oporu lub temperamentu zastępczego wyróżniono:

- połączenie szeregowe elementów,
- połączenie równoległe elementów,

a także połączenia nie zezwalające na dokonanie wymienionej operacji, a mianowicie:

- połączenia przekątne elementów (gdy przy wspólnym węźle występuje bocznica przekątna),
- połączenia quasi-przekątne elementów.

W. Roszczynialski w pracy [105] wyróżnia siedem typów par bocznic. Podstawą zaliczania do danego typu jest charakter zależności $Q_j(R_i)$, gdzie R_i jest zmienianym oporem w i-tej bocznicy, a Q_j obserwowanym wydatkiem powietrza w j-tej bocznicy. Podana w pracy [105] klasyfikacja par bocznic jest następująca:

- połączenie szeregowe: zależność $Q_j(R_i)$ jest malejąca,
- połączenie równoległe: zależność $Q_j(R_i)$ jest rosnąca,
- połączenie przekątne, w którym wyróżniono:
  - szeregowo-przekątne: zależność $Q_j(R_i)$ jest malejąca, przy pewnym R_i wydatek Q_j obniża się do wartości ujemnych,
  - równoległo-przekątne: zależność $Q_j(R_i)$ jest rosnąca, przy pewnym R_i wydatek Q_j obniża się do wartości ujemnych,
  - quasi-przekątne, w którym wyróżniono:
    - szeregowo-przekątne: zależność $Q_j(R_i)$ jest niemonotoniczna i posiada lokalne minimum,
    - równoległo-przekątne: zależność $Q_j(R_i)$ jest niemonotoniczna i posiada lokalne maksimum,
    - nieistotne: wydatek Q_j nie zależy od oporu R_i.

Przedstawioną klasyfikację należy uważać za interesującą ze względu na próbę usystematyzowania także par bocznic nie posiadających wspólnych węzłów. Podane przykłady zależności niemonotonicznych $Q_j(R_i)$ dla par bocznic, które w pracy [105 tab.6.1] nazwano bocznicami quasi-przekątnymi, budzą jednak pewne wątpliwości. Do tej uwagi powrócimy w rozdz. 3.8. Podana klasyfikacja wykorzystuje także charakter zależności $Q_j(R_i)$ do ustalania typu połączenia. Dotychczas raczej postępowano w inny sposób. Struktura sieci wskazywała na prawidłowości występujące przy przepływach. Za bardziej przydatne dla praktyki należałoby więc uważać uzyskiwanie informacji o prawidłowościach przepływowych wynikających z analizy struktury sieci.

Ważną relacją określoną na zbiorze bocznic jest przynależność dwu bocznic do tej samej drogi poprowadzonej od węzła początkowego w_{ps} do węzła końcowego w_{ks} sieci. Relacja ta wykorzystana została przez W. Budryka (prąd główny, prąd boczny) w teorii stabilizacji rozpływów powietrza i oddymiania bocznic w przypadkach, gdy występują odwrócenia prądów bocznych przy pożarach w prądach wznoszących lub odwrócenia prądu głównego przy pożarach w prądach schodzących.

Inne zastosowania to wyznaczanie stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza [85,132]. Formalnie relacja ta może być zapisana w postaci macierzy drogi - bocznice tak jak to pokazał J. Gustkiewicz [65]. Dla dużych sieci, w których liczba dróg $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$ wynosi kilka tysięcy, zapis ten może być skrócony przez sporządzenie macierzy typu bocznica - bocznica, w której przynależność dwu bocznic do tej samej drogi umownie zapisana jest w sposób binarny. Znane są algorytmy tworzenia zapisu skróconego takiej macierzy.

Inna, bardziej ogólna relacja na zbiorze bocznic może być określona przez wykorzystanie przynależności bocznic do wszystkich cykli przechodzących przez bocznicę zamykającą. Aktualnie ze względu na bardzo dużą liczbę takich cykli nie istnieje jeszcze możliwość ich wyznaczania w dużych rzeczywistych sieciach. Zagadnienie to może być jednak przydatne przy analizie mniejszych podsieci, a przy dalszych uproszczeniach także niektórych fragmentów sieci. Rolę bocznicy zamykającej pełni wtedy bocznica zastępująca otoczenie podsieci. Sposób wyznaczania tych wszystkich wymienionych cykli jest identyczny z przedstawionym w rozdz. 2.8.2 przy opisie metody wyznaczania bocznic przekątnych. Takie same są także utrudnienia związane z czasem pracy dostępnych komputerów.

Bocznice przekątne w wymienionych cyklach, jak to pokazano w rozdz. 2.8.2, występują ze znakami "+" lub "-". Analiza aktualnego nieawaryjnego stanu przepływowego w sieci, w którym acykliczna orientacja bocznic może

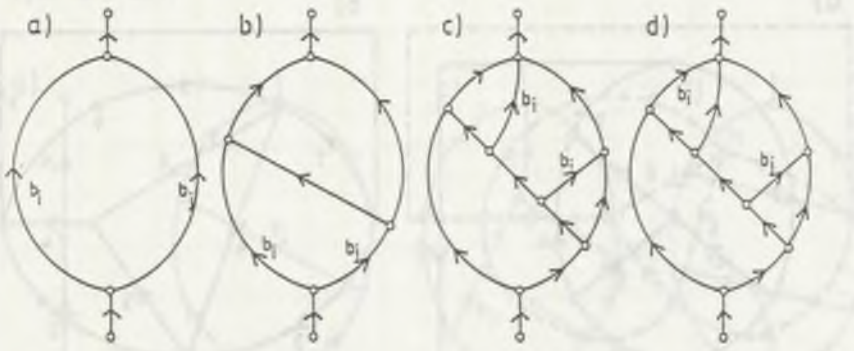
być przyjęta zgodnie z aktualnymi kierunkami przepływu powietrza, upoważnia do określenia dla pary bocznic b_i, b_j następującej relacji $\eta^{(r)}$:

$$\eta_{ij}^{(r)} = \begin{cases} 0, & \text{gdy istnieje cykl zewnętrzny (zawierający bocznicę zamykającą } b_z\text{), w którym } b_z,\ b_i \text{ oraz } b_j \text{ występują z dodatnimi znakami,} \\ r, & \text{gdy nie istnieje cykl zewnętrzny, w którym } b_z,\ b_i,\ b_j \text{ występują z dodatnimi znakami.} \end{cases} \quad (9.2.1)$$

$i, j, = 1,2,\ldots,m \qquad i \neq j \neq z \qquad m$ - liczba bocznic w sieci,

z - wskaźnik dla bocznicy zamykającej.

Symbol "r" nawiązuje do połączenia równoległego bocznic b_i, b_j (rys. 2.9.2a). Dla takich bocznic właśnie nie istnieje cykl przechodzący przez bocznicę zamykającą, w którym obydwie bocznice b_i, b_j występowałyby ze znakami dodatnimi. Podobną właściwość posiadają pary bocznic b_i, b_j pokazane na rys. 2.9.2b,c,d. Będziemy je traktować jako pokrewne do połączenia równoległego lub inaczej będą to pary quasi-równoległe. Wyodrębnienie takich par będzie potrzebne przy analizie znaków wrażliwości (rozdział 3).



Rys. 2.9.2. Połączenie równoległe bocznic bi, bj (a) oraz pary bocznic bi, bj quasi-równoległe (b,c,d)

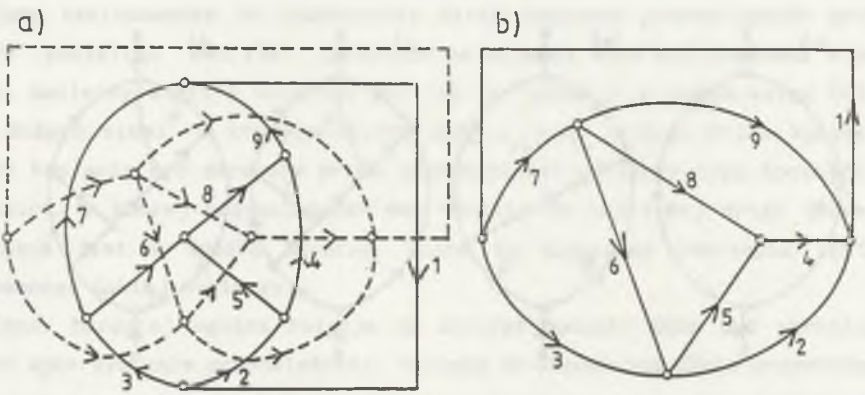
Fig. 2.9.2. Parallel connection of the branches bi, bj (a) and the pair of quasi-parallel branches bi, bj (b,c,d)

Można tu wyróżnić kilka charakterystycznych przypadków (rys. 2.9.2):

- bocznice b_i, b_j posiadają wspólny węzeł i jest to węzeł początkowy lub końcowy obydwu bocznic (rys. 2.9.2b),
- bocznice b_i, b_j należą do tego samego cyklu-komórki w sieci płaskiej, lecz są położone w różnych drogach od węzła dolnego w_{dk} do węzła górnego w_{gk} komórki (rys. 2.9.2c),
- bocznice b_i, b_j nie należą do tej samej komórki (lecz nie istnieje cykl zewnętrzny, w którym występują z tym samym znakiem rys. 2.9.2d).

Nadmienić należy, że wprowadzona relacja dotyczy ustalonej acyklicznej orientacji bocznic zgodnej z rzeczywistymi kierunkami przepływu w początkowym stanie pracy sieci. Dokonanie zmiany w kierunkach przepływu, a tym samym przyjęcie innej orientacji bocznic może spowodować, że relacja ta nie będzie już spełniona.

W sieciach płaskich tworem dualnym do cyklu przechodzacego przez bocznicę zamykającą jest przekrój całkowity przez sieć. W rozdziale 2.3 pokazano sposób wyznaczania takiego przekroju poprowadzonego przez bocznice-odbiory powietrza. Wszystkie przekroje całkowite przez sieć płaską mogą być wyznaczane z grafu dualnego do grafu reprezentującego schemat kanoniczny sieci (rys. 2.9.3a,b). Wspomniano już, że przy redukcji niektórych schematów sieci wentylacyjnych grafami dualnymi posługiwał się Sułkowski [124]. W pracy sporządzono odpowiednie programy wyznaczające graf dualny do grafu płaskiego. Wyznaczenie wszystkich przekrojów całkowitych przez sieć polega na wyznaczaniu w grafie dualnym wszystkich cykli przechodzących przez bocznicę zamykającą i może być realizowane tym samym programem wyznaczania cykli zewnętrznych w sieci podstawowej.



Rys. 2.9.3. Przykład sieci przekątnej płaskiej (a) oraz sieci dualnej (b)
Fig. 2.9.3. Example of a flat diagonal network (a) and a dual network (b)

Na podstawie wyznaczonych przekrojów całkowitych można określić relację $\eta^{(s)}$ występowania bocznic b_i, b_j w tych przekrojach:

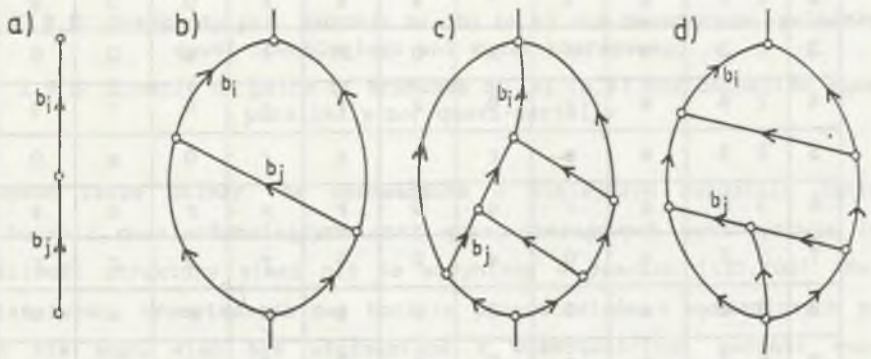
$$\eta_{ij}^{(s)} = \begin{cases} 0, \text{ gdy istnieje przekrój całkowity przez sieć,} \\ \quad \text{w którym } b_i, b_j \text{ występują ze znakami dodatnimi,} \\ s, \text{ gdy nie istnieje przekrój całkowity przez sieć,} \\ \quad \text{w którym } b_i, b_j \text{ występują ze znakami dodatnimi} \end{cases} \qquad (9.2.2)$$

$i, j, = 1,2,\ldots,m \qquad i \neq j \qquad m$ - liczba bocznic w sieci,

Przyjmiemy także, że $\eta_{iz}^{(s)} = \eta_{zi}^{(s)} = s$, gdzie z jest wskaźnikiem bocznicy zamykającej.

Symbol "s" nawiązuje do połączenia szeregowego bocznic b_i, b_j (rys. 2.9.4a). Dla takich bocznic właśnie nie istnieje przekrój całkowity, w którym b_i, b_j występowałyby ze znakami dodatnimi. Podobną właściwość posiadają pary bocznic b_i, b_j pokazane na rys. 2.9.4b,c,d. Będziemy je traktować jako pokrewne do połączenia szeregowego lub inaczej - będą to pary quasi-szeregowe. Wyodrębnienie takich par będzie przydatne przy analizie znaków wrażliwości w rozdziale 3. Można tu także wyróżnić kilka charakterystycznych przypadków pokazanych na rys. 2.9.4:

- bocznice b_i, b_j posiadają wspólny węzeł, lecz węzeł końcowy bocznicy b_i jest węzłem początkowym bocznicy b_j lub odwrotnie (rys. 2.9.4b),
- bocznice b_i, b_j należą do tego samego cyklu-komórki w sieci płaskiej i leżą w tej samej drodze od węzła dolnego w_{dk} do węzła górnego w_{gk} komórki (rys. 2.9.4c),
- bocznice b_i, b_j nie należą do tego samego cyklu-komórki (lecz nie istnieje przekrój całkowity, w którym występują z tym samym znakiem rys. 2.9.4d).



Rys. 2.9.4. Połączenie szeregowe bocznic bi, bj (a) oraz pary bocznic bi, bj quasi-szeregowe (b,c,d)

Fig. 2.9.4. Serial connection of the branches bi, bj (a) and quasi-serial branches bi, bj (b,c,d)

W tym przypadku istotna jest także przytoczona wcześniej uwaga o obowiązującej orientacji bocznic. Nadmienić także trzeba, że wyznaczanie wszystkich przekrojów całkowitych przez sieć (podsieć) niepłaską w związku z nieistnieniem grafu dualnego wymaga opracowania innego algorytmu niż to wcześniej pokazano dla sieci płaskich.

Relacje $\eta_{ij}^{(r)}$ (9.2.1), $\eta_{ij}^{(s)}$ (9.2.2) dla wybranej pary bocznic b_i, b_j nie mogą być jednocześnie prawdziwe. Upoważnia to do określenia macierzy $H = [\eta_{ij}]$ w sposób następujący:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} r, & \text{gdy} \quad \eta_{ij}^{(r)} = r \\ s, & \text{gdy} \quad \eta_{ij}^{(s)} = s \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \qquad (9.2.3)$$

$$i, j = 1,2,\ldots,m.$$

Przykład takiej macierzy dla sieci z rys 2.9.1a pokazano w tabeli 2.9.2.

Tabela 2.9.2

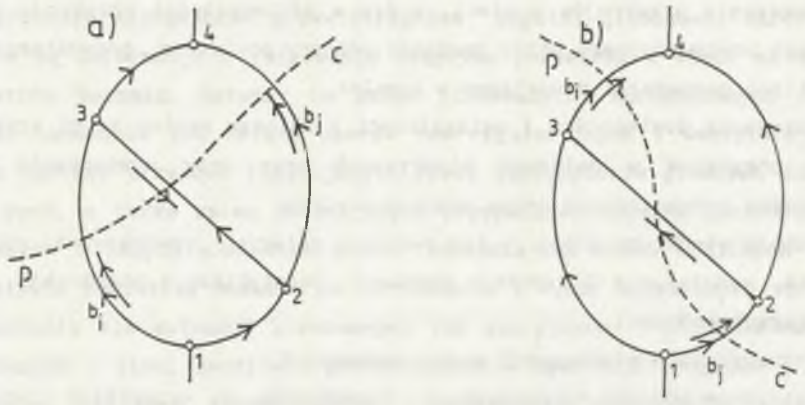
Bocznice quasi-równoległe i quasi-szeregowe w sieci z rys.2.9.1a

Bocznice sieci		Bocznice sieci								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
nr	w_p w_k	7 1	1 2	1 3	2 6	2 5	3 5	3 7	5 6	6 7
1	7 1	x	s	s	s	s	s	s	s	s
2	1 2	s	x	r	s	s	r	0	0	s
3	1 3	s	r	x	0	r	s	s	0	0
4	2 6	s	s	0	x	r	r	0	r	s
5	2 5	s	s	r	r	x	r	0	s	0
6	3 5	s	r	s	0	r	x	r	s	s
7	3 7	s	0	s	0	0	r	x	r	r
8	5 6	s	0	0	r	s	s	r	x	s
9	6 7	s	s	0	s	0	s	r	s	x

r - połączenie równoległe lub quasi-równoległe,
s - połączenie szeregowe lub quasi-szeregowe,
0 - pary bocznic nie tworzące połączenia quasi-równoległego ani quasi-szeregowego

Ze sposobu definiowania η_{ij} wynika, że jest to relacja symetryczna. Na uwagę zasługuje fakt, że nie wszystkie wyrazy pokazanej macierzy uzyskały wartości różne od zera. Na przykład parę bocznic 3 i 9 (rys. 2.9.1a) nie zakwalifikowano jako pary quasi-szeregowej, ponieważ bocznice te należą do cyklu zewnętrznego 3 6 8 9 1 (rys. 2.9.1a wg numeracji bocznic),

w którym występują z dodatnimi znakami oraz bocznice te należą do przekroju całkowitego 3 -6 9 (rys. 2.9.1a wg numerów bocznic), w którym także występują z dodatnimi znakami. Inne przykłady takich par bocznic b_i, b_j, które także nie zostały zakwalifikowane jako pary quasi-szeregowe lub quasi-równoległe, pokazano na rys. 2.9.5a,b. Istnieje cykl zewnętrzny, w którym b_i, b_j występują z tym samym znakiem oraz przekrój całkowity P-C, w którym b_i, b_j także występują z tym samym znakiem.



Rys. 2.9.5. Przykłady par bocznic bi, bj (a,b) nie tworzących połączenia quasi-równoległego ani quasi-szeregowego

Fig. 2.9.5. Example of pairs of branches bi, bj (a,b) not connected quasi-parallelly nor quasi-serially

Dodać także należy, że wprowadzone w niniejszym rozdziale definicje bocznic quasi-równoległych oraz quasi-szeregowych wykorzystują inną właściwość struktury sieci niż to uczyniono w pracach [121,105]. Nazwy i właściwości odpowiednich par bocznic przedstawione w wymienionych pracach nie mogą więc być utożsamiane z właściwościami bocznic quasi-równoległych i quasi-szeregowych podanymi w niniejszej pracy.

2.10. Opracowany ciąg programów analizy struktury sieci

Przeprowadzone w niniejszej części pracy badania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej zmierzały także do wypracowania skutecznych metod, algorytmów i programów komputerowych analizy struktury oraz właściwości poszczególnych bocznic w sieci. Rozwój metod numerycznych badania właściwości obiektów technicznych z wykorzystaniem komputerów umożliwia prowadzenie prac w tym zakresie. Wyniki tych badań ułatwiają przeprowadza-

nie wielu analiz sieci, a także wskazują na występowwanie zagadnień wymagających innego niż dotychczas traktowania poruszanych problemów.

Opracowany ciąg metod, algorytmów i programów komputerowych analizy struktury sieci można uszeregować w następujący sposób:

- kontrola poprawności zapisu struktury sieci, w tym kontrola orientacji bocznic; szczególna kontrola może dotyczyć orientacji acyklicznej w sensie dróg,
- wyznaczanie warstw węzłów w sieci (poziomów) przydatne przy rysowaniu schematu kanonicznego oraz w dalszych algorytmach,
- wyznaczanie przekrojów w sieci, w tym w szczególności przekroju całkowitego poprowadzonego przez bocznice-odbiory powietrza, przydatnego przy analizie gospodarki powietrzem w kopalni,
- wyznaczanie dostępności i osiągalności w zbiorze węzłów sieci acyklicznej przydatne w dalszych algorytmach oraz przy wyznaczaniu stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza,
- redukcja struktury sieci, w tym redukcja połączeń szeregowych, równoległych, wydzielanie i redukcja podsieci, identyfikacja hierarchii w ciągach podsieci,
- rozstrzyganie o planarności sieci (podsieci),
- wyznaczanie bocznic normalnych i przekątnych z wszystkich łańcuchów przez sieć oraz wyznaczanie bocznic przekątnych I rodzaju w sieciach zredukowanych,
- wyznaczanie bocznic normalnych i przekątnych w sieciach płaskich zredukowanych,
- wyznaczanie bocznic normalnych i przekątnych przy dowolnym położeniu źródła wymuszającego przepływ,
- wyznacznie par bocznic quasi-równoległych i quasi-szeregowych,
- wyznaczanie struktury sieci dualnej dla sieci płaskiej.

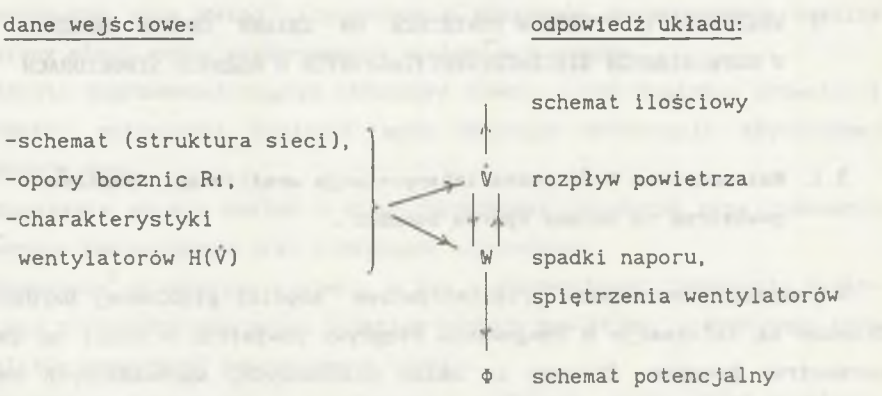
Opracowane programy zostały przetestowane na dużym zbiorze sieci. Większość nadaje się do wdrożenia w kopalniach. Nieliczne z tych programów z uwagi na zastosowaną metodę badania wybranego zagadnienia, wymagającą długiego czasu pracy komputera, można stosować dla sieci lub podsieci o ograniczonej liczbie elementów. Niektóre z tych programów posiadają wyłącznie znaczenie badawcze.

3. WRAŻLIWOŚCI WYDATKÓW POWIETRZA NA ZMIANY OPORÓW BOCZNIC W KOPALNIANYCH SIECIACH WENTYLACYJNYCH O RÓŻNYCH STRUKTURACH

3.1. Matematyczna i fizyczna interpretacja wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic

W procesie kierowania przewietrzaniem kopalni głębinowej bardzo potrzebne są informacje o reagowaniu rozpływu powietrza w sieci na zmiany parametrów bocznic. Dotyczy to zmian planowanych, wprowadzonych celowo poprzez budowanie lub zmianę oporów tam regulacyjnych i wentylacyjnych, zmianę nastawy urządzeń regulujących pracę wentylatorów głównych lub pomocniczych, a także zmian powstających przypadkowo wskutek uszkodzeń wymienionych i innych elementów sieci. Wcześniejsza ocena możliwych zmian w rozpływie powietrza pozwala na opracowanie i wybór optymalnych sposobów postępowania dla sytuacji planowanych lub awaryjnych. Posiadanie aktualnych danych o sieci umożliwia przeprowadzanie symulacji rozpływu z wykorzystaniem obliczeń komputerowych i opracowanie dpowiednich wniosków. W kopalniach nie posiadających takiej możliwości podejmowanie prawidłowych decyzji wymaga dużego doświadczenia i wiedzy osób kierujących przewietrzaniem.

Przepływ powietrza przez kopalnię, a także rozdział do poszczególnych miejsc pracy załogi uzależniony jest od pracy wentylatorów głównych, oporów wyrobisk, tam regulacyjnych i wentylacyjnych, struktury sieci oraz od czynników naturalnych. Schematycznie przedstawiono to na rys. 3.1.1. W stanie normalnym (ustalonym) dla aktualnych danych wejściowych uzyskuje się odpowiedź układu, czyli wydatki powietrza $\dot{V}_{1a}$ w poszczególnych bocznicach, spadki naporu W_{1a}, konkretne wartości spiętrzeń wentylatorów H_{1a}. Takie przyporządkowanie realizuje się w kopalni bez znajomości przez człowieka konkretnej formuły matematycznej przypisującej danym wejściowym odpowiedź układu, a także w trakcie obliczeń rozpływu powietrza w sieci, w których to obliczeniach sprecyzowany jest opis matematyczny uzyskiwania wyników. Wyniki te z pomiarów w kopalni lub z obliczeń służą do sporządzania dogodnych do analizy schematów: ilościowego, potencjalnego i innych.



Rys. 3.1.1. Schemat zależności między wybranymi wielkościami opisującymi kopalnianą sieć wentylacyjną

Fig. 3.1.1. Diagram of relations between some selected quantities describing the ventilation network of a mine

Wprowadzenie lub przypadkowe zaistnienie zmiany w danych wejściowych powoduje, że odpowiedź układu jest inna. W większym lub mniejszym stopniu zmienia się wtedy rozpływ powietrza, spadki naporu, spiętrzenia wentylatorów. Zmieniają swoją postać analizowane schematy, tzn. ilościowy oraz potencjalny. Uzyskiwanie informacji o powstających zmianach możliwe jest poprzez przeprowadzanie odpowiednich prób w kopalni lub wykonywanie obliczeń rozpływu. Często wielowariantowe obliczenia służą do wybrania optymalnego sposobu ukształtowania sieci lub jej fragmentu. Czasami dla uzyskania dużej pewności, gdy to jest potrzebne i możliwe, dodatkowo wykonywana jest próba w kopalni potwierdzająca celowość zastosowania wybranego wariantu.

W trakcie przeprowadzania obliczeń i analiz sieci wykorzystuje się wiele różnych współczynników obrazujących aktualny stan pracy sieci, a także ujmujących w różny sposób powiązania elementów. Takimi przydatnymi współczynnikami mogą być także wrażliwości różnych zmiennych zależnych opisujących przepływ powietrza w sieci na zmiany wielkości, które są traktowane jako zmienne niezależne. Dla praktyki najbardziej interesujące są wrażliwości wydatków powietrza na zmiany parametrów bocznic, w tym w szczególności na zmiany oporów. Te ostatnie zależności będą przedmiotem dalszej analizy w niniejszym rozdziale.

Wrażliwości (czułości) wykorzystywane są w wielu dziedzinach nauki i techniki, między innymi w teorii sterowania, tolerancji, przy projektowaniu różnych układów [64,35,36,37,38,100]. Wiążą one zmienną zależną

$y(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, zwaną także funkcją układową ze zmiennymi niezależnymi $x_1, x_2, \ldots, x_n$, zwanymi także parametrami układu. Zmianę funkcji układowej y w sąsiedztwie nominalnych wartości parametrów x_{10}, $x_{20}, \ldots$ x_{n0} układu przedstawić można w przybliżony sposób w następującej postaci:

$$\Delta y \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y(x_{io})}{\partial x_i} \Delta x_i, \qquad (3.1.1)$$

gdzie:

$\Delta y = y - y_o$ - zmiana wartości funkcji układowej,

$\Delta x_i = x_i - x_{io}$ - zmiana i-tego parametru i = 1,2,...,n,

y_o, x_{io} - wartość początkowa funkcji układowej oraz i-tego parametru,

$\frac{\partial y(x_{io})}{\partial x_i}$ - wartość pochodnej cząstkowej funkcji układowej y względem i-tego parametru, obliczona w początkowym punkcie pracy x_{io}, nazywana wrażliwością bezwzględną.

Oprócz wrażliwości bezwzględnych stosowane są także wrażliwości względne $\frac{\partial \ln y}{\partial \ln x_i}$, a także półwzględne $\frac{\partial \ln y}{\partial x_i}$ lub $\frac{\partial y}{\partial \ln x_i}$

W kopalnianej sieci wentylacyjnej każdy wydatek powietrza $\dot{V}_i$ może być traktowany jako zależny od oporów R_j:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_i(R_1, R_2, \ldots, R_j, \ldots, R_m) \qquad i,j = 1,2,\ldots,m. \qquad (3.1.2)$$

Niektóre z tych zależności mogą być silne, inne bardzo słabe. Informacje te można uzyskać znając wrażliwości $\partial \dot{V}_i / \partial R_j$ obliczone dla aktualnego stanu pracy sieci. Wrażliwość wydatku $\dot{V}_i$ na zmianę oporu R_j może więc być także interpretowana jako wartość granicy następującego ilorazu różnicowego:

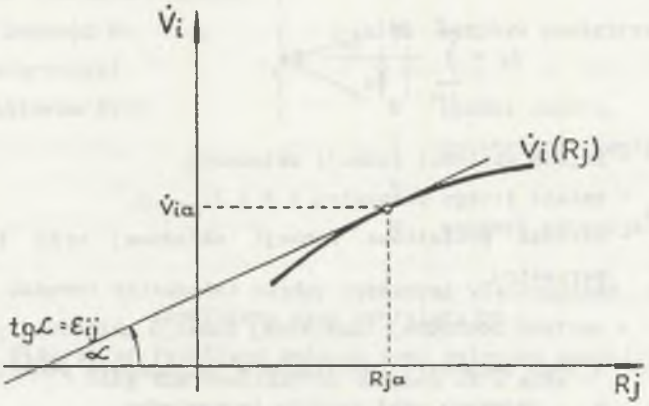
$$\varepsilon_{ij} = \lim_{R_j \to R_{ja}} \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_{ia}}{R_j - R_{ja}} = \lim_{\Delta R_j \to 0} \frac{\Delta \dot{V}_i}{\Delta R_j} = \frac{\partial \dot{V}_i}{\partial R_j}(R_{ja}) = \operatorname{tg}\alpha \qquad (3.1.3)$$

Ilustruje to także rys. 3.1.2. Współczynnik kierunkowy tgα stycznej do wykresu $\dot{V}_i(R_j)$ jest poszukiwaną wrażliwością i świadczy o rosnącym, słabym lub malejącym charakterze zależności $\dot{V}_i(R_j)$ w otoczeniu aktualnego punktu pracy R_{ja}. Dla prostoty zapisu wrażliwość oznaczać będziemy przez ε_{ij}.

W praktyce mogą być przydatne informacje o wartościach wrażliwości ε_{ij} dla wybranego wydatku $\dot{V}_i$, tzn. w jaki sposób wszystkie opory R_j wpływają

na wydatek $\dot{V}_i$ oraz odwrotnie, w jaki sposób wybrany j-ty opór R_j wpływa na wszystkie wydatki $\dot{V}_i$. W ogólnym przypadku można mówić o macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$:

$$\mathbb{E} = [\varepsilon_{ij}] \qquad i,j = 1,2,\ldots,m \qquad (3.1.4)$$



Rys. 3.1.2. Wrażliwość ε_{ij} jako współczynnik kierunkowy stycznej tgα do wykresu zależności $\dot{V}_i(R_j)$

Fig. 3.1.2. Sensitivity ε_{ij} as the directivity factor of the tangent tgα to the diagram of the relation $\dot{V}_i(R_j)$

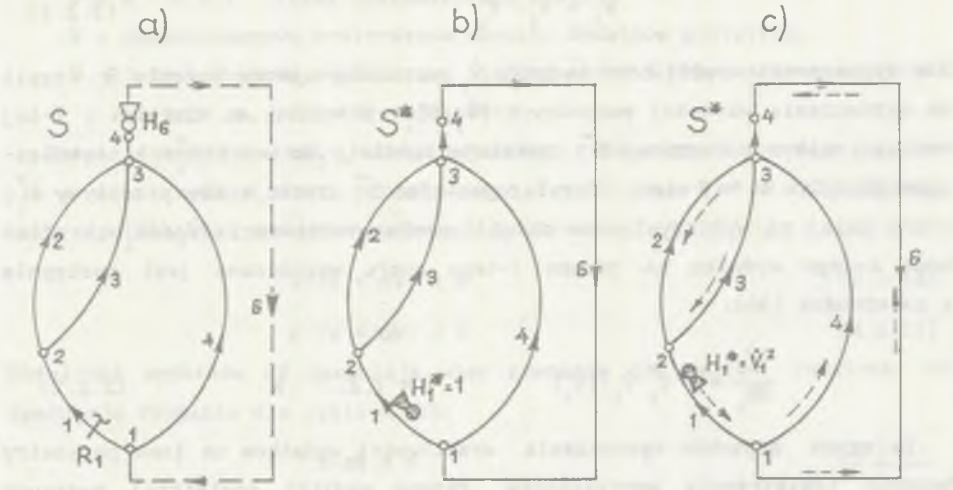
W literaturze dotyczącej przepływów powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej dostrzeżono celowość posługiwania się wrażliwościami wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic. Wielkość ta oraz inne związane z wrażliwościami używane są w pracy Simode'a [112] do ilustracji i analizy zmian wydatku powietrza przy zmianach oporów bocznic, spiętrzeń wentylatorów. Simode nie podaje jednak efektywnych metod wyznaczania współczynników wrażliwości. W pracach [13,95,103,130] współczynniki te proponuje się wyznaczać metodą przyrostową z dwu rozwiązań sieci. W. Roszczynialski [105] prowadząc badania wrażliwości najpierw kilkakrotnie rozwiązuje sieć zakładając w obliczeniach stopniowo narastające wartości oporu R_i wybranej bocznicy. Uzyskane wyniki obliczeń umożliwiają dobór odpowiedniej zależności między analizowanym wydatkiem powietrza Q_j a zmienianym oporem R_i. Obliczenie wartości pochodnej tej zależności w początkowym punkcie pracy R_{io} prowadzi do wyznaczenia poszukiwanej wrażliwości. Taki sposób wyznaczania wrażliwości może być usprawiedliwiony na etapie prowadzenia prac badawczych. Wymogi praktyczne wskazują na celowość stosowania bardziej prostych metod.

Ciekawy sposób wyznaczenia dowolnego wiersza macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$ podał J. Chojcan [36 1975r]. Wyznaczanie dowolnej kolumny tej macierzy po-

przez modyfikację metody Chojcana opracowane zostało w Zakładzie Aerologii Górniczej Politechniki Śląskiej [72 1980r, 60 1988r]. Szerzej metody te zostaną omówione w dalszej części pracy.

3.2. Metody wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic

Zagadnienie wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany parametrów bocznic było przedmiotem rozważań w pracy [36]. J. Chojcan dla wyznaczenia dowolnego l-tego wiersza macierzy $\mathbb{E}$ wykorzystuje znane w elektrotechnice twierdzenie Tellegena. W specjalny sposób konstruuje



Rys. 3.2.1. Sieć podstawowa S normalna (a); sieć dołączona S* do wyznaczania wiersza macierzy wrażliwości wg metody Chojcana (b); sieć dołączona S* do wyznaczania kolumny macierzy wrażliwości wg proponowanej metody (c)

Fig. 3.2.1. Normal basic network S (a); additional network S* used to determine the row of the matrix of sensitivity in compliance with the method proposed by Chojcan (b); additional network S* used to determine the column of the matrix of sensitivity put forward in the present paper (c)

sieć dołączoną S^* (rys. 3.2.1a,b) o strukturze takiej, jaką ma sieć podstawowa. Elementy (bocznice) sieci S^* posiadają opory R_i^* równe:

$$R_i^* = \frac{dW_i}{d\dot{V}_i}(\dot{V}_{ia}), \qquad (3.2.1)$$

gdzie wartość pochodnej wyznaczana jest w aktualnym punkcie pracy i-tej

bocznicy sieci podstawowej. Zależności $W_i(\dot{V}_i)$ są charakterystykami bocznic w sieci podstawowej S i posiadają postać:

$$W_i = R_i \cdot \dot{V}_i \cdot |\dot{V}_i| \quad \text{dla bocznic z oporem,} \tag{3.2.2}$$

$$W_i = -H_i(\dot{V}_i) \text{ dla bocznic z wentylatorem o charakterystyce } H(\dot{V}). \tag{3.2.3}$$

Bocznicom, które w sieci podstawowej posiadają założony stały wydatek powietrza $\dot{V}_i = \text{const}$, w sieci dołączonej Chojcan przypisuje przepływ $V_i^* = 0$ (co jest równoważne z istnieniem nieskończenie dużego oporu R_i^* w tej bocznicy). Konstruowana sieć dołączona S^* jest siecią liniową. Charakterystyki elementów pasywnych są następujące:

$$W_i^* = R_i^* \cdot V_i^* \tag{3.2.4}$$

Dla wyznaczenia wrażliwości wydatku $\dot{V}_1$ na zmiany oporów bocznic R_i, czyli do wyznaczania wartości pochodnych $\partial \dot{V}_1 / \partial R_i$ $i = 1,\ldots,m$, Chojcan w 1-tej bocznicy sieci dołączonej S^* instaluje źródło o wartości $H_i^* = 1$, wymuszające przepływ w tej sieci. Rozwiązując sieć S^* uzyskuje się przepływy $\dot{V}_i^*$, które dalej są wykorzystywane do obliczenia wrażliwości $\partial \dot{V}_1 / \partial R_i$. Wrażliwość 1-tego wydatku na zmianę i-tego oporu wyznaczana jest następnie z zależności [36]:

$$\frac{\partial \dot{V}_1}{\partial R_i} = - V_i^* \cdot \dot{V}_i \cdot |\dot{V}_i| \qquad i = 1,2,\ldots,m \tag{3.2.5}$$

Dalszych sposobów wyznaczania wrażliwości wydatków na inne parametry bocznic (spiętrzenia wentylatorów, zadane wydatki powietrza) podanych w pracy [36] nie będziemy przedstawiać.

Wyznaczenie kolejnego wiersza macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$ wymaga powtórzenia obliczeń. Sieć dołączona S^* jest wtedy identyczna z tą różnicą, że źródło H^* wymuszające przepływ instalowane jest w kolejnej bocznicy.

Uzyskanie wartości wyrazów dowolnej r-tej kolumny macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$ wydatków powietrza na zmianę oporu r-tej bocznicy możliwe jest przez przekształcenie równań równowagi sieci [72, 60]. W stanie normalnym (aktualnym) pracy sieci spełnione są równania:

- I prawo Kirchhoffa dla węzłów:

$$\mathbb{S} \cdot \dot{\mathbb{V}} = \mathbb{0} \tag{3.2.6}$$

- II prawo Kirchhoffa dla cykli:

$$\mathbb{C} \cdot \mathbb{W} = \mathbb{0} \tag{3.2.7}$$

- charakterystyki bocznic:

$$W_i = R_i \cdot \dot{V}_i \cdot |\dot{V}_i| \qquad \text{dla bocznic z oporem} \qquad (3.2.8)$$

$$H_i = H_i(\dot{V}_i) \qquad \text{dla bocznic z wentylatorem} \qquad (3.2.9)$$

gdzie:

$\dot{V}_i$ - wydatek objętościowy powietrza, m^3/s,

W_i, H_i - strata lub przyrost energii na jednostkę objętości przepływającego powietrza J/m^3, Pa,

R_i - opór bocznicy, kg/m^7,

S - macierz węzłowo-bocznicowa o wymiarach $(n-1)\cdot m$,

C - macierz cyklowo-bocznicowa o wymiarach $\nu \cdot m$,

n - liczba węzłów w sieci,

$\nu = m - n + 1$ liczba cyklomatyczna sieci,

$\dot{V}$ - jednokolumnowa m-wierszowa macierz wydatków powietrza,

W - jednokolumnowa m-wierszowa macierz strat i przyrostów energii powietrza na jednostkę objętości.

Zaistnienie zmiany dR_r jednego wybranego r-tego oporu powoduje powstanie w sieci nowego stanu przepływowego $\dot{V} + d\dot{V}$ oraz $W + dW$, dla którego także spełnione są równania węzłowe i cyklowe:

$$S\cdot(\dot{V} + d\dot{V}) = 0 \qquad (3.2.10)$$

$$C\cdot(W + dW) = 0 \qquad (3.2.11)$$

Różniczki wydatków $d\dot{V}$ spełniają więc równania dla węzłów, różniczki dW spełniają równania dla cykli sieci:

$$S\cdot d\dot{V} = 0 \qquad (3.2.12)$$

$$C\cdot dW = 0 \qquad (3.2.13)$$

Związek między różniczką i-tego wydatku $d\dot{V}_i$ oraz i-tego rozproszenia energii dW_i można uzyskać z charakterystyki i-tej bocznicy. Dla bocznic posiadających opór R_i zależność ta przy założeniu, że wydatek $\dot{V}_r$ w aktualnym stanie pracy sieci jest dodatni, przyjmuje następującą postać:

$$dW_i = \begin{cases} 2\cdot R_i \cdot |\dot{V}_i| \cdot \dfrac{d\dot{V}_i}{dR_r} \cdot dR_r & \text{dla } i \neq r \qquad (3.2.14) \\ \dot{V}_r^2 \cdot dR_r + 2\cdot R_r \cdot \dot{V}_r \cdot \dfrac{d\dot{V}_r}{dR_r} \cdot dR_r & \text{dla } i = r \qquad (3.2.15) \end{cases}$$

Dodajmy dla wyjaśnienia, że w tak rozpatrywanym zagadnieniu jedyną zmienną niezależną jest opór R_r, co upoważnia do używania pochodnych zwyczajnych.

Dla wentylatorów o charakterystykach $H_i(\dot{V}_i)$ można przyjąć:

$$H_i(\dot{V}_i) = - W_i(\dot{V}_i) \tag{3.2.16}$$

Różniczkę dW_i dla tych bocznic można wtedy przedstawić w sposób następujący:

$$dW_i = \frac{-dH_i}{d\dot{V}_i} \cdot \frac{d\dot{V}_i}{dR_r} \cdot dR_r \tag{3.2.17}$$

Dla wentylatorów pracujących na opadającej części charakterystyki $H(\dot{V})$ prawdziwa jest więc następująca relacja:

$$\frac{-dH_i}{d\dot{V}_i} \geq 0$$

Zależności (3.2.14), (3.2.15), (3.2.17) prawdziwe dla odpowiednich różniczek słuszne są także dla pochodnych $\frac{d\dot{V}_i}{dR_r}$, $\frac{dW_i}{dR_r}$, czyli dla wrażliwości ε_{ir}. Powstaje więc następujący układ równań (3.2.18):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m} s_{ji} \cdot \frac{d\dot{V}_i}{dR_r} = 0 & j = 1,2,\ldots,n-1 \quad (3.2.18a) \\ \sum_{i=1}^{m} c_{ki} \cdot \frac{dW_i}{dR_r} = 0 & k = 1,2,\ldots,\nu \quad (3.2.18b) \\ \frac{dW_i}{dR_r} = \begin{cases} 2 \cdot R_i \cdot |\dot{V}_i| \cdot \frac{d\dot{V}_i}{dR_r} & \text{dla } i \neq r \quad (3.2.18c) \\ \dot{V}_r^2 + 2 \cdot R_r \cdot \dot{V}_r \cdot \frac{d\dot{V}_r}{dR_r} & \text{dla } i = r \quad (3.2.18d) \\ \frac{-dH_i}{d\dot{V}_i} \cdot \frac{d\dot{V}_i}{dR_r} & \text{dla bocznic z wentylatorem} \quad (3.2.18e) \end{cases} \end{cases}$$

gdzie: s_{ji} oraz c_{ki} są elementami macierzy $\mathbf{S}$ oraz $\mathbf{C}$ przyjmującymi wartości 1, -1, 0, co wynika ze sposobu przynależności i-tej bocznicy do j-tego węzła lub k-tego cyklu.

Układ równań (3.2.18) można traktować jako algebraiczny układ równań liniowych z niewiadomymi wartościami pochodnych $\frac{dV_i}{dR_r}$, $\frac{dW_i}{dR_r}$ w aktualnym stanie pracy sieci. Wszystkie opory R_i, wydatki powietrza $\dot{V}_i$ oraz wartości pochodnych $\frac{dH_i}{dV_i}$ uważać będziemy za znane z aktualnego stanu pracy sieci. W układzie równań (3.2.18) wielkości te będą pełniły rolę współczynników przy niewiadomych lub wyrazów wolnych. Przyjmiemy następujące oznaczenie pomocnicze:

$$R_i^* = \begin{cases} 2 \cdot R_i \cdot |\dot{V}_i| & \text{dla bocznic z oporem} \quad (3.2.19a) \\ -\frac{dH_i}{d\dot{V}_i}(\dot{V}_{ia}) & \text{dla bocznic z wentylatorem} \quad (3.2.19b) \end{cases}$$

Z układu równań (3.2.18) łatwo można wyeliminować wartości pochodnych $\frac{dW_i}{dR_r}$. Po wprowadzeniu proponowanych przekształceń otrzymuje się:

$$(3.2.20) \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^{m} s_{ji} \cdot \varepsilon_{ir} = 0 & j = 1,2,\ldots,n-1 \quad (3.2.20a) \\ \sum_{i=1}^{m} c_{ki} \cdot R_i^* \cdot \varepsilon_{ir} = \begin{cases} 0 & \text{gdy k-ty cykl nie zawiera r-tej bocznicy} \quad (3.2.20b) \\ -c_{kr} \cdot \dot{V}_r^2 & \text{gdy k-ty cykl zawiera r-tą bocznicę} \quad (3.2.20c) \end{cases} & k = 1,2,\ldots,\nu \end{cases}$$

Powstały układ równań (3.2.20) z uwagi na niewiadome wartości wrażliwości ε_{ir} jest układem równań liniowych o m niewiadomych. Liczba równań wynosi:

$$n - 1 + \nu = n - 1 + m - n + 1 = m$$

i jest równa liczbie niewiadomych. Macierz współczynników tego układu składa się z liczb s_{ji}, $c_{ki} \cdot R_i^*$. W skład kolumny wyrazów wolnych wchodzą zera dla równań powstałych z równań węzłowych i z równań cyklowych nie zawierających r-tej bocznicy oraz liczby $-c_{kr} \cdot \dot{V}_r^2$ dla równań powstałych z równań cyklowych zawierających r-tą bocznicę. Układ jest łatwo rozwiązywalny powszechnie znanymi metodami. Dla dużych sieci potrzebne są obliczenia komputerowe.

W trakcie badań opracowano odpowiedni algorytm i program przygotowujący z cyfrowego zapisu modelu sieci i z wyników obliczeń rozpływu stanu aktualnego dane wejściowe do obliczeń wrażliwości ε_{ir} oraz rozwiązujący powstały układ równań (3.2.20). Przy testowaniu metody i programu uzyskiwane wyniki wrażliwości ε_{ir} porównywane były z wynikami z metody J. Chojcana oraz z wynikami metody przyrostowej (w której wrażliwość może być w przybliżony sposób wyznaczana z ilorazu $\Delta\dot{V}_i/\Delta R_r$). Wyniki porównywano także z wartościami pochodnej $d\dot{V}_i/dR_r$ dla wybranych przypadków, gdy istnieje możliwość wyprowadzenia zależności $\dot{V}_i(R_r)$, a tym samym wyznacze-

nia wartości tej pochodnej. Wszystkie porównania przyniosły odpowiedź pozytywną co do poprawności przedstawionej metody i opracowanego programu.

Posiadając wyznaczone wrażliwości ε_{ir}, czyli wartości pochodnych $d\dot{V}_i/dR_r$ z zależności (3.2.14), (3.2.15), (3.2.17) wyznaczyć można także wartości pochodnych dW_i/dR_r oraz dH_i/dR_r. Istnieje więc możliwość sprawdzania, w jaki sposób rozpływ powietrza oraz pole ciśnień i potencjałów reagują w aktualnym stanie pracy sieci na wprowadzoną elementarną zmianę oporu. Przykłady wyników obliczeń i ich analizę podamy w dalszej części pracy.

Uzyskanie wartości ε_{ir} innej kolumny macierzy wrażliwości Ξ wymaga przeprowadzenia identycznych obliczeń. W przypadkach skrajnych, gdy potrzebna jest pełna macierz Ξ, obliczenia należy wykonywać dla $r = 1,2,\ldots,m$. Przedstawiona metoda wyznaczania wrażliwości stanowi więc uzupełnienie do metody opracowanej wcześniej przez Chojcana.

Dodać należy, że w przypadku prostych schematów sieci wentylacyjnych lub podsieci znaki wrażliwości dla osób kierujących przewietrzaniem są oczywiste, ponieważ wynika to z doświadczenia zawodowego tych osób. W bardziej złożonych przypadkach mogą wystąpić trudności z oceną wpływów proponowanych zmian oporów na rozpływ powietrza. W obliczeniach komputerowych znaki oraz wartości wrażliwości są zapamiętywane i mogą być użyte (po opracowaniu odpowiednich dalszych programów) do rozwiązywania kolejnych zagadnień związanych z przepływem powietrza w sieci.

3.3. Interpretacja sieciowa metody wyznaczania dowolnej kolumny macierzy wrażliwości

Powstały układ równań (3.2.20) do wyznaczania wrażliwości wydatków powietrza ε_{ir} na zmianę r-tego oporu może otrzymać interpretację sieciową. Opisuje on przepływ w sieci, którą także nazywać będziemy siecią dołączoną S^*. Struktura tej sieci jest taka sama jak sieci podstawowej oraz sieci dołączonej Chojcana, ponieważ macierze S oraz $\mathbb{C}$ tych sieci są identyczne. Poszczególne grupy równań układu (3.2.20 a, b, c) interpretować można jako równania dla węzłów i cykli w sieci dołączonej S^*. Wartości ε_{ir} są szukanymi przepływami w tej sieci. Ze względu na charakterystyki bocznic $W_i^* = R_i^* \cdot \varepsilon_{ir}$ przy stałych współczynnikach R_i^* jest to sieć liniowa. Wyrazy wolne $\dot{V}_r^2$ występujące w niektórych równaniach (3.2.20c) dla cykli zawierających r-tą boczniczę traktować można jako źródło $H_r^* = -\dot{V}_r^2$ zlokalizowane w r-tej bocznicy, wymuszające przepływ w sieci dołączonej S^*.

Analiza znaku przy $H_r^* = -\dot{V}_r^2$ wskazuje, że źródło to w r-tej bocznicy wymusza w sieci dołączonej (rys. 3.2.1c) przepływ ε_{rr} o kierunku przeciwnym niż przepływ powietrza w r-tej bocznicy sieci podstawowej (rys. 3.2.1a). Wrażliwość ε_{rr} wydatku $\dot{V}_r$ na zmianę oporu R_r jest ujemna, co jest oczywiste, ponieważ wzrost R_r powoduje w sieci podstawowej zmniejszanie się wydatku powietrza $\dot{V}_r$.

Interesujące jest porównanie kierunków przepływu wymuszanych w sieci dołączonej przez źródło $H_r^* = -\dot{V}_r^2$ z kierunkami przepływu powietrza w sieci podstawowej. Ilustruje to rys. 3.2.1c, gdzie strzałkami przerywanymi zaznaczono przepływ w sieci dołączonej S^*. Przykład na rys. 3.2.1c przedstawia sieć normalną, gdzie występują wyłącznie równoległe i szeregowe połączenia bocznic bądź fragmentów sieci. Przy jednym źródle przepływu $H_r^* = -\dot{V}_r^2$ w sieci dołączonej (rys. 3.2.1c) kierunki przepływu ε_{ir} są jednoznaczne. Zgodność strzałki przerywanej (sieć dołączona) oraz zaznaczonej na bocznicy (sieć podstawowa) oznacza dodatnią wartość ε_{ir}. Wzrost oporu R_r powoduje wtedy w sieci podstawowej wzrost wydatku $\dot{V}_i$. Przeciwne zwroty wymienionych strzałek świadczą o ujemnej wartości ε_{ir}. Wzrost oporu R_r w sieci podstawowej powoduje wtedy zmniejszanie się wydatku $\dot{V}_i$. Sieć dołączona S^* oraz wartości ε_{ir} obrazują więc rozchodzenie się zaburzenia w sieci spowodowanego elementarnym przyrostem oporu dR_r.

Przykład sieci dołączonej pokazany na rys. 3.2.1c celowo dobrano jako bardzo prosty, gdzie występujące zależności są oczywiste. W sieciach bardziej złożonych z bocznicami przekątnymi znaki wrażliwości ε_{ir} trudno oszacować bez przeprowadzenia odpowiednich obliczeń. Zagadnienie to będzie przedmiotem analizy w następnych rozdziałach.

3.4. Niektóre właściwości pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic

W trakcie przeprowadzania badań wrażliwości zauważono występowanie charakterystycznych właściwości pełnej macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$. W obliczeniach w praktyce macierz ta w pełnej postaci prawdopodobnie nie będzie wykorzystywana. Najbardziej interesujące są wiersze odpowiadające bocznicom odbiorom powietrza (miejsca pracy załogi) z uwagi na informacje zawarte w tych wierszach o silnych lub słabych wpływach pozostałych oporów na wydatek powietrza w tych bocznicach. Interesujące są także informacje zawarte w kolumnach odpowiadających bocznicom, których opór w praktyce może się zmieniać i może istotnie wpływać na zmiany w rozpływie. Spotrzeżenia

dotyczące symetrii znaków wrażliwości względem głównej przekątnej w pełnej macierzy, a także związki między wyrazami i-tego wiersza oraz i-tej kolumny są godne przedstawienia. Związki między tymi wyrazami położonymi na miejscu ij oraz ji w macierzy $\mathbb{E}$ można przedstawić w następującej postaci (przy założeniach, że wszystkie wydatki są dodatnie):

$$\frac{1}{\dot{V}_j^2}\cdot\frac{d\dot{V}_i}{dR_j} = \frac{1}{\dot{V}_i^2}\cdot\frac{d\dot{V}_j}{dR_i} \qquad \text{lub} \qquad \frac{1}{\dot{V}_j^2}\cdot\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\dot{V}_i^2}\cdot\varepsilon_{ji} \qquad (3.4.1)$$

i ustalone (i-ty wiersz oraz i-ta kolumna), $j = 1,2,\ldots,m$

Oznacza to, że znaki wrażliwości ε_{ij} oraz ε_{ji} są takie same oraz że między wydatkami $\dot{V}_i$, $\dot{V}_j$ a wrażliwościami ε_{ij}, ε_{ji} zachodzi ścisły związek.

Uzasadnienie tych prawidłowości wynika ze sposobów wyznaczania wrażliwości i-tego wiersza oraz i-tej kolumny. W obydwu sposobach korzysta się z sieci dołączonych S^* o tej samej strukturze (rys. 3.2.1b,c). Są to sieci liniowe. Opory elementów R_i^* przyjmują identyczne wartości. Źródła H_i^* wymuszające przepływ instalowane są w tej samej i-tej bocznicy. Na rys. 3.2.1b,c jest to bocznica 1. Różnica w proponowanym kierunku pracy tego źródła H_i^* nie jest istotna, co dalej zostanie wyjaśnione. W metodzie przy wyznaczaniu wrażliwości ε_{ij} dla konkretnego i-tego wiersza Chojcan proponuje, by źródło to posiadało wartość $H_i^* = 1$. W metodzie drugiej (rys. 3.2.1c) przy wyznaczaniu wrażliwości ε_{ji} i-tej kolumny proponuje się, by źródło to posiadało wartość $H_i^* = -\dot{V}_i^2$. Opór całkowity R_c^* sieci S^* widziany z zacisków źródła H_i^* w obydwu sieciach dołączonych jest jednakowy, co wynika z identycznej struktury oraz z tych samych oporów elementów R_i^*. Weźmiemy pod uwagę dowolną n-tą bocznicę w każdej sieci dołączonej (rys. 3.2.1b,c). Poszukiwany przepływ w sieci dołączonej Chojcana (rys. 3.2.1b) oznaczymy przez $\bar{V}_n$ a w sieci z rys. 3.2.1c przez V_n^*. Przepływy w obydwu sieciach są wprost proporcjonalne do wartości, którą posiada źródło, co można zapisać w sposób następujący:

- dla sieci z rys. 3.2.1b $\qquad \bar{V}_n = k_n \cdot \bar{H}_i = k_n \cdot 1 \qquad (3.4.2)$
- dla sieci z rys. 3.2.1c $\qquad V_n^* = k_n \cdot H_i^* = -k_n \cdot \dot{V}_i^2 \qquad (3.4.3)$

gdzie k_n jest współczynnikiem proporcjonalności. Znak "-" w zależności (3.4.3) wynika z odwrotnej pracy źródła $H_i^* = -\dot{V}_i^2$. Słuszna jest więc następująca równość:

$$\frac{\bar{V}_n}{1} = -\frac{V_n^*}{\dot{V}_i^2} \qquad (3.4.4)$$

Wrażliwość $d\dot{V}_i/dR_n$ i-tego wydatku $\dot{V}_i$ na zmianę n-tego oporu R_n w metodzie Chojcana związana jest z $\bar{V}_n$ w sposób następujący:

$$\frac{d\dot{V}_i}{dR_n} = -\bar{V}_n \cdot \dot{V}_n^2 \qquad (3.4.5)$$

W metodzie drugiej wrażliwość $d\dot{V}_i/dR_n$ n-tego wydatku $\dot{V}_n$ na zmianę i-tego oporu jest równa przepływowi V_n^*. Z zależności (3.4.4, 3.4.5) otrzymuje się:

$$\frac{1}{\dot{V}_n^2} \cdot \frac{d\dot{V}_i}{dR_n} = \frac{1}{\dot{V}_i^2} \cdot \frac{d\dot{V}_n}{dR_i}$$

Bocznicę n-tą obrano w sposób dowolny ,co oznacza, że zależność (3.4.1) jest słuszna dla wszystkich par wyrazów ε_{ij}, ε_{ji} i-tego wiersza oraz i-tej kolumny j = 1,2,...,m macierzy $\mathbb{E}$. Wyznaczanie i-tego wiersza tej macierzy zezwala więc na szybkie wyznaczanie i-tej kolumny i na odwrót. W praktyce oznacza to, że posiadamy informacje, w jaki sposób wszystkie opory R_j wpływają na i-ty wydatek $\dot{V}_i$ oraz w jaki sposób opór R_i wpływa na wszystkie

Tabela 3.4.1

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys 3.2.1a (przykład do obliczeń wrażliwości wydatków powietrza na przyrosty oporów bocznic)

Nr b_i	Węzły w_p	w_k	Opór R [g/m^7]	Wydatek $\dot{V}$ [m^3/min]	[m^3/s]	Dys.ΔW [Pa]	Spiętrz.H [Pa]
1	1	2	75.6	4000.0	66.66	336.0	0.0
2	2	3	40.0	2400.0	40.00	64.0	0.0
3	2	3	90.0	1600.0	26.66	64.0	0.0
4	1	3	360.0	2000.0	33.33	400.0	0.0
5	3	4	10.0	6000.0	100.00	100.0	0.0
6	4	1	10.0	6000.0	100.00	100.0	600.0

Tabela 3.4.2

Przykład wyników obliczeń pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza E na przyrosty oporów bocznic w sieci z rys. 3.2.1 (dane wejściowe do obliczeń z tab. 3.4.1)

b_i	Węzły w_p	Węzły w_k	Opór R_i^*	Wrażliwość ε_{i1}	Wrażliwość ε_{i2}	Wrażliwość ε_{i3}	Wrażliwość ε_{i4}	Wrażliwość ε_{i5}	Wrażliwość ε_{i6}
1	1	2	10.080	-2.880E+02	-6.222E+01	-1.843E+01	1.028E+01	-5.555E+02	-5.555E+02
2	2	3	3.200	-1.728E+02	-2.373E+02	7.782E+01	6.172E+00	-3.333E+02	-3.333E+02
3	2	3	4.800	-1.152E+02	1.751E+02	-9.626E+01	4.115E+00	-2.222E+02	-2.222E+02
4	1	3	24.000	4.115E+01	8.888E+00	2.633E+00	-4.115E+01	-2.777E+02	-2.777E+02
5	3	4	2.000	-2.469E+02	-5.333E+01	-1.580E+01	-3.086E+01	-8.333E+02	-8.333E+02
6	4	1	2.000	-2.469E+02	-5.333E+01	-1.580E+01	-3.086E+01	-8.333E+02	-8.333E+02

b_i - numer bocznicy, R_i^* - opór bocznicy w sieci dołączonej,

w_p - węzeł początkowy, ε_{ij} - wrażliwość i-tego wydatku powietrza

w_k - węzeł końcowy, na przyrost j-tego oporu

wydatki $\dot{V}_j$. Zauważyć także trzeba, że wrażliwości bezwzględne są wprost proporcjonalne do kwadratu wydatku powietrza bocznicy, w której zachodzi zmiana oporu. Pokrywa się to z obserwacjami praktycznymi.

W tab. 3.4.2 jako przykład zestawiono wyniki obliczeń pełnej macierzy wrażliwości dla małej sieci normalnej z rys. 3.2.1a. Dane o początkowym (aktualnym) stanie przepływowym w tej sieci podano w tab. 3.4.1.

Dodać także trzeba, że przedstawione uwagi o symetrii znaków w macierzy $\mathbb{E}$ oraz o zależnościach między wyrazami i-tego wiersza oraz i-tej kolumny nie pokrywają się z wynikami zestawionymi w niektórych tabelach w pracy [105], gdzie nie zawsze występuje pokazana wyżej symetria znaków w macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$.

3.5. Analiza wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w sieciach normalnych

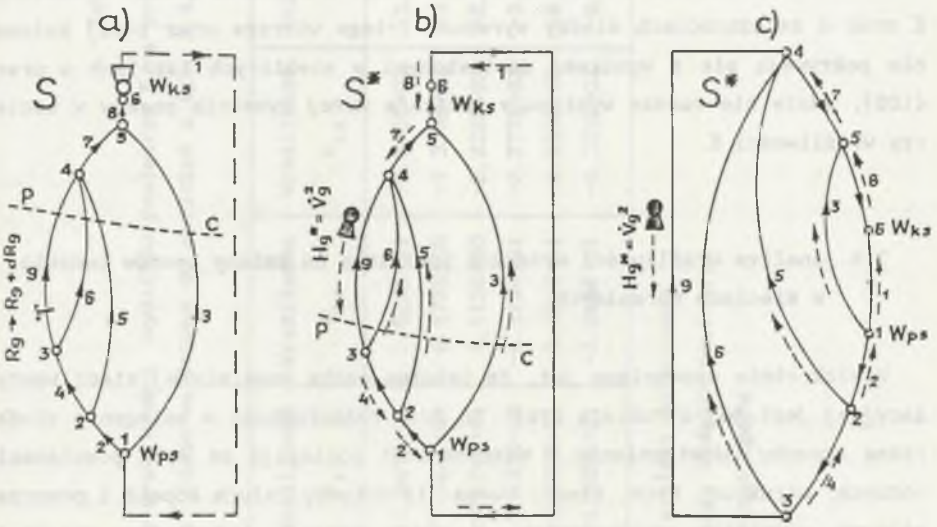
Wielokrotnie wspomniano już, że istotną cechą kopalnianej sieci wentylacyjnej jest jej struktura oraz że duża różnorodność w zaleganiu złoża, różne sposoby udostępnienia i eksploatacji pociągają za sobą powstawanie różnych struktur tych sieci. Uwaga ta dotyczy całych kopalń i poszczególnych oddziałów wydobywczych. W wielu pracach wykazywano znaczenie struktury sieci w procesie kierowania przewietrzaniem kopalni.

Struktura wpływa również na występowanie prawidłowości w zakresie wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic. Najbardziej regularne a tym samym oczywiste właściwości posiadają sieci normalne, tzn. takie, w których występują wyłącznie szeregowe i równoległe połączenia bocznic i fragmentów sieci. Przykład takiej sieci z jednym wentylatorem pokazano na rys. 3.5.1a. Wpływ zaburzenia w takich sieciach w postaci wzrostu oporu w jednej z bocznic może być oceniany i wyznaczany prostymi sposobami. Bez większego trudu można wskazać, w których bocznicach nastąpi wzrost lub zmniejszanie się wydatku powietrza. Przykład ten zamieszczamy jednak celowo dla porównania go z innymi sieciami.

Niech zaburzenie w postaci wzrostu oporu wystąpi w bocznicy 9 (rys. 3.5.1.a), tzn. $R_9 \rightarrow R_9 + dR_9$. Wyznaczenie wrażliwości wydatków powietrza $\varepsilon_{19} = d\dot{V}_1/dR_9$ $i = 1,2,\ldots,9$ na powstałą zmianę oporu w aktualnym stanie pracy sieci, może być realizowane przez rozwiązanie odpowiedniego układu równań (3.2.20). W interpretacji sieciowej rozwiązanie to sprowadza się do obliczenia przepływów ε_{19} w sieci dołączonej S^* (rys. 3.5.1b). W bocznicy 9 tej sieci zgodnie z wcześniej przedstawioną metodą należy umieścić

źródło o wartości $H_9^* = -\dot{V}_9^2$, wymuszające przepływy ε_{19}. Opory bocznic R_i^* posiadają wartości zgodnie ze wzorami (3.2.19 a, b, c). Na rys. 3.5.1b naniesiono podwójne strzałki:

- na bocznicach odpowiadające kierunkom wydatków $\dot{V}_i$ z sieci podstawowej,
- obok bocznic (strzałki przerywane) odpowiadające kierunkom przepływu ε_{19} w sieci dołączonej.



Rys. 3.5.1. Sieć podstawowa S normalna (a) i sieć dołączona S* z jednoznacznymi znakami wrażliwości $\mathcal{E}_{ir}$ dla bocznic należących do tej samej drogi $w_{ps} \rightarrow b_r \rightarrow w_{ks}$ oraz do przekroju P-C (b,c)

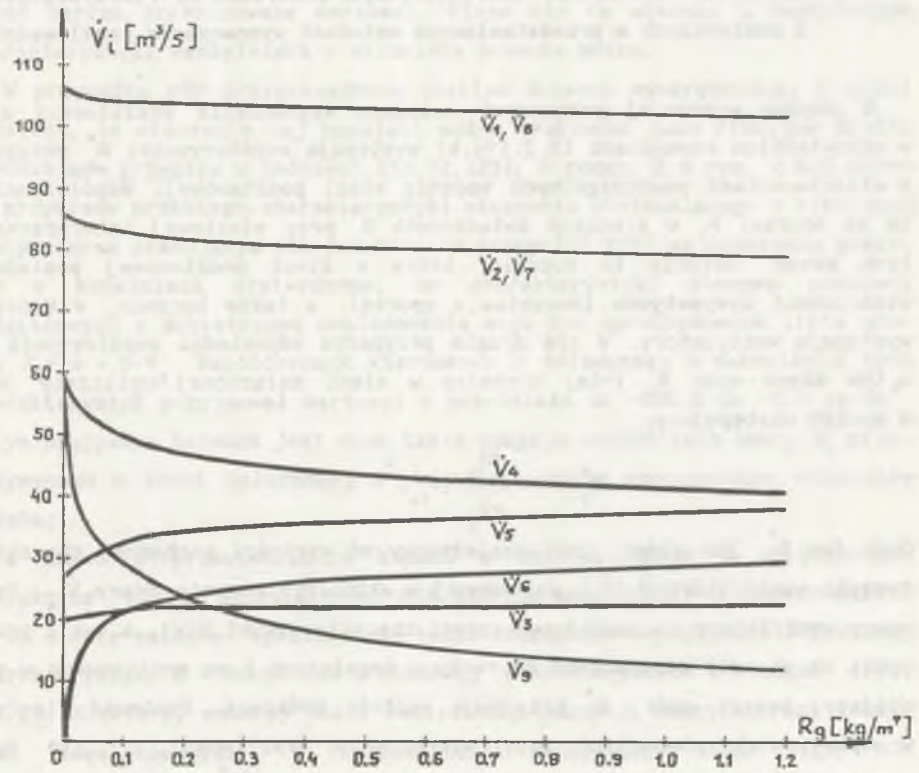
Fig. 3.5.1. Normal basic network S (a) and additional network S* with the explicit sign of sensitivity $\mathcal{E}_{ir}$ for branches situated along the path $w_{ps} \rightarrow b_r \rightarrow w_{ks}$ and in the cross-section P-C (b,c)

W rozdz. 3.3 objaśniono, że zgodność obydwu strzałek w interpretacji sieciowo-graficznej wrażliwości oznacza wrażliwość ε_{ir} dodatnią oraz odwrotnie. W sieci na rys. 3.5.1b bez trudu można powiedzieć, że wydatki w bocznicach 6, 5 i 3 będą rosły wraz ze wzrostem oporu R_9. Dla tych bocznic ε_{19} jest dodatnie. Wydatki powietrza w bocznicach 1, 2, 4, 9, 7 i 8 będą ulegać zmniejszeniu. Wrażliwość ε_{19} dla tych bocznic jest ujemna. Pokazano to także na rys. 3.5.1c, który przedstawia schemat kanoniczny przekształcony z uwypukleniem bocznicy źródłowej 9 w sieci dołączonej S*. Przepływy ε_{19} (strzałki przerywane rys. 3.5.1b,c) obrazują rozchodzenie się zaburzenia w sieci spowodowanego wzrostem oporu R_9 na $R_9 + dR_9$.

W sieciach normalnych z jednym wentylatorem i bez innych źródeł ruchu kierunki przepływu powietrza są zawsze jednoznaczne. Struktura sieci

dołączonej S^* dla wyznaczania ε_{1r} nie ulega zmianie. W tym przypadku sieć dołączona jest więc także siecią normalną (rys. 3.5.1c) z jednoznacznymi kierunkami ε_{1r}. Bez trudu zbiór bocznic w takiej sytuacji można rozdzielić na dwa podzbiory:

- bocznice, w których wystąpi zmniejszenie się wydatku powietrza ($\varepsilon_{1r} < 0$). Należą one do tej samej drogi skierowanej od węzła początkowego sieci w_{ps} poprzez r-tą bocznicę ze zwiększanym oporem i dalej do węzła końcowego sieci w_{ks} (rys. 3.5.1a, droga wg nuwerów bocznic: 2 4 9 7 8 1),
- bocznice, w których wystąpi zwiększenie się wydatku powietrza ($\varepsilon_{1r} > 0$). Są to bocznice znajdujące się w przekroju całkowitym "P-C" przez sieć poprowadzonym przez bocznicę 9 (rys. 3.5.1a, bocznice 6, 5, 3). Prądy powietrza w tych bocznicach można także nazywać prądami bocznymi względem bocznicy r-tej (w tym przypadku względem bocznicy 9).



Rys. 3.5.2. Przykłady zależności $\dot{V}_i(R_9)$ w sieci normalnej z rys. 3.5.1a

Fig. 3.5.2. Example of the relation $\dot{V}_i(R_9)$ in the normal network shwon in Fig. 3.5.1a

Analiza rysunku 3.5.1 oraz właściwości sieci normalnych wskazuje, że znaki wrażliwości ε_{ir} w sieciach normalnych są zawsze jednoznaczne (przy pracy wentylatora na opadającej części charakterystyki). Znak pochodnej $d\dot{V}_i/dR_r$ nie zmienia się, co wskazuje, że zależności $\dot{V}_i(R_r)$ są zawsze monotoniczne. Przykłady takich zależności dla sieci normalnej z rys. 3.5.1 pokazano na rys. 3.5.2:

- wydatki powietrza $\dot{V}_9$, $\dot{V}_4$, $\dot{V}_2$, $\dot{V}_7$, $\dot{V}_1$, $\dot{V}_8$ zmniejszają się wraz ze wzrostem oporu R_9,
- wydatki powietrza $\dot{V}_6$, $\dot{V}_5$, $\dot{V}_3$ rosną wraz ze wzrostem oporu R_9.

Wrażliwość ε_{ir} będąca współczynnikiem kątowym nachylenia stycznej do wykresu widoczna jest w różnych nachyleniach (rys. 3.5.2) wykresów tych zależności $\dot{V}_i(R_9)$.

3.6. Znaczenie nachylenia charakterystyk wentylatorów rzeczywistych i zastępczych w przedstawionych metodach wyznaczania wrażliwości

W obydwu wcześniej pokazanych metodach wyznaczania wrażliwości ε_{ir}, w odpowiednich równaniach (3.2.19a,b) występują współczynniki R_i^* związane z właściwościami poszczególnych bocznic sieci podstawowej. Współczynniki te są oporami R_i^* w sieciach dołączonych S^* przy sieciowej interpretacji tych metod. Dotyczy to bocznic, które w sieci podstawowej posiadają właściwości dysypatywne (bocznice z oporem), a także bocznic, w których występują wentylatory. W tym drugim przypadku odpowiedni współczynnik R_i^* a tym samym opór R_i^* i-tej bocznicy w sieci dołączonej wyliczany jest w sposób następujący:

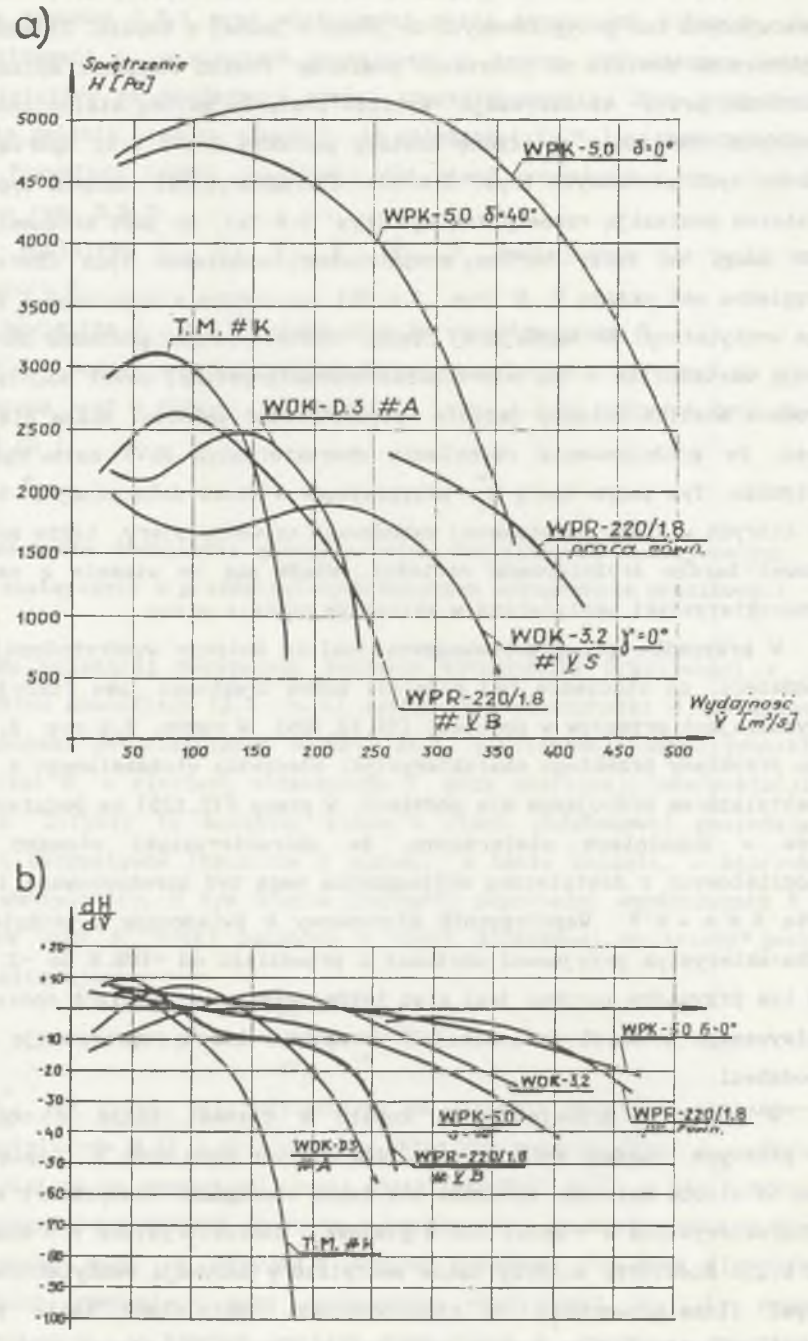
$$R_i^* = - \frac{dH_i}{d\dot{V}_i} (\dot{V}_{ia})$$

Opór ten R_i^*, jak widać, jest uzależniony od wartości pochodnej charakterystyki wentylatora $H_i(\dot{V}_i)$ obliczonej w aktualnym punkcie pracy $\dot{V}_{ia}$. Przy pracy wentylatora na opadającej części charakterystyki $H(\dot{V})$, a takie przypadki są obecnie dopuszczane do ruchu w kopalniach i są analizowane w niniejszej pracy, opór R_i^* przyjmuje wartość dodatnią. Ponieważ figuruje w odpowiednich równaniach przy wyznaczaniu wrażliwości ε_{ir}, to mogą wystąpić sytuacje, w których wartość tego oporu R_i^* będzie w znaczący sposób wpływać na uzyskiwane rozwiązania ε_{ir}. Podkreślić w tym miejscu trzeba znany fakt posiadania informacji o przebiegu charakterystyki wentylatora $H(\dot{V})$, a tym samym o nachyleniu tej charakterystyki, co uzyskuje się przez ocenę przebiegu pochodnej $dH/d\dot{V}$.

Na rys. 3.6.1a podano przykłady kilku charakterystyk $H(\dot{V})$ wentylatorów pracujących lub przygotowanych do pracy w jednej z kopalń. Zależności $H(\dot{V})$ wyznaczone zostały na podstawie pomiarów. Postać równania opisującą $H(\dot{V})$ uzyskano przez aproksymację wyników pomiarów metodą wielomianów ortogonalnych. Następnie obliczone zostały pochodne $H'(\dot{V})$ oraz sporządzono wykresy tych pochodnych (rys. 3.6.1b). Charakterystyki różnych typów wentylatorów posiadają różne przebiegi (rys. 3.6.1a), co jest zrozumiałe. Godne uwagi są także bardzo zróżnicowane nachylenia tych charakterystyk względem osi układu $\dot{V}$, H (rys. 3.6.1b), co wynika z właściwości konkretnego wentylatora. Na opadającej części charakterystyki pochodne $dH/d\dot{V}$ przyjmują wartości od 0 (na wierzchołku charakterystyki) nawet do -100 kg/sm^4. Podana analiza dotyczy jedynie wybranych wentylatorów. Można się spodziewać, że zróżnicowanie nachylenia charakterystyk $H(\dot{V})$ może być jeszcze większe. Tym samym opory R_i^*, przypisywane w sieci dołączonej S^* bocznicom, w których w sieci podstawowej zabudowane są wentylatory, także mogą przyjmować bardzo zróżnicowane wartości. Wiąże się to właśnie z nachyleniem charakterystyki wentylatora w aktualnym punkcie pracy.

W przypadku gdy przeprowadzana analiza dotyczy wyodrębnionej z sieci podsieci, to otoczenie tej podsieci można traktować jako fikcyjne źródło wymuszające przepływ w podsieci [55,72,125]. W rozdz. 2.6 rys. 2.6.2 podano przykłady przebiegu charakterystyki otoczenia utożsamianego z fikcyjnym wentylatorem pracującym dla podsieci. W pracy [72,125] na podstawie pomiarów w kopalniach stwierdzono, że charakterystyki otoczeń podsieci oddziałowych z dostateczną dokładnością mogą być aproksymowane linią prostą $H_z = a + b \cdot \dot{V}_z$. Współczynnik kierunkowy b świadczący o nachyleniu tych charakterystyk przyjmował wartości z przedziału od -108.8 do -2.9 kg/sm^4. W tym przypadku istotna jest więc także uwaga o wartościach oporu R_i^* przypisywanego w sieci dołączonej S^* bocznicy, która reprezentuje otoczenie podsieci.

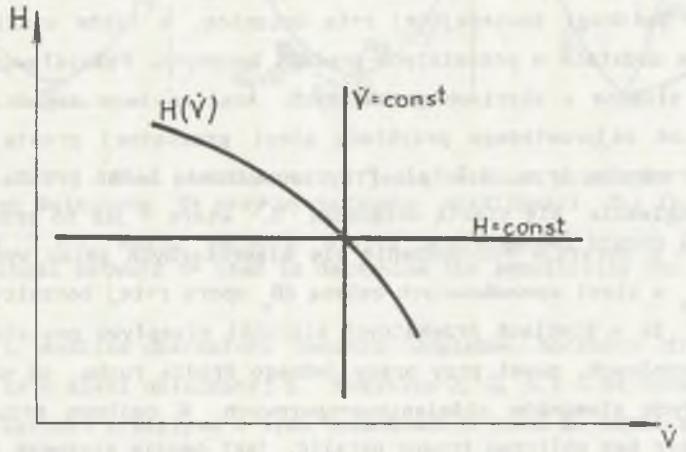
W nauce o przewietrzaniu kopalń a czasami także w obliczeniach w praktyce oprócz wentylatorów, dla których wydajność $\dot{V}$ i spiętrzenie H są od siebie zależne, wyróżnia się także szczególne wentylatory o poziomej charakterystyce H = const lub o pionowej charakterystyce $\dot{V}$ = const (rys. 3.6.2). Niektórzy autorzy takie wentylatory nazywają wentylatorami idealnymi (idealizowanymi). W rzeczywistości wentylatory takie nigdy nie występują. Posiadają jednak dość istotne znaczenie teoretyczne jako graniczne przypadki charakterystyki płaskiej H = const i charakterystyki stromej $\dot{V}$ = const. Przebiegi rzeczywiste $H(\dot{V})$ przy pracy na części opadającej przyjmują położenia pośrednie (rys 3.6.2).



Rys. 3.6.1. Wybrane charakterystyki ciśnieniowo-wydajnościowe H(V̇) wentylatorów głównych (a) oraz wykresy pochodnych H'(V̇) (b)

Fig. 3.6.1. Some selected pressure-efficiency characteristics H(V̇) of main fans (a) and diagrams of their derivatives H'(V̇) (b)

Wykorzystanie wentylatorów szczególnych, np. H = const, umożliwiło rozwiązanie niektórych zagadnień teorii sieci wentylacyjnej [28,29]. Sułkowski wyróżnia klasę sieci zmieniających charakter z przekątnych na normalne lub odwrotnie, w zależności od właściwości bocznicy zamykającej, co wiąże się z występowaniem idealnego źródła ruchu w tej bocznicy [121]. Sieci takie nazywa sieciami hybrydowymi. Do tej klasy sieci zalicza sieć przekątną prostą, a także sieci Szwyrkowa.



Rys. 3.6.2. Idealizowane (fikcyjne) charakterystyki wentylatorów: pozioma H = const, pionowa V̇ = const

Fig. 3.6.2. Idealised (fictitious) characteristics of fans: horizontal H = const, vertical V̇ = const

W niniejszej pracy w niektórych sytuacjach przy analizie wrażliwości ε_{ir} także wykorzystywać będziemy szczególne (idealne) charakterystyki wentylatorów traktując je świadomie jako przypadki graniczne przebiegów rzeczywistych. Opory R_i^* odpowiednich bocznic w sieci dołączonej S^* będą wtedy przyjmowały następujące wartości:

- przy H_i = const $\quad dH_i/d\dot{V}_i = 0 \quad R_i^* = 0.$

W sieci dołączonej S^* odpowiednia bocznica będzie wtedy posiadała opór zerowy. Węzły krańcowe takiej bocznicy można wtedy zlepić, co w niektórych przypadkach upraszcza strukturę sieci S^* i ułatwia sprecyzowanie wniosków,

- przy $\dot{V}_i$ = const $\quad dH_i/d\dot{V}_i = \infty \quad R_i^* = \infty.$

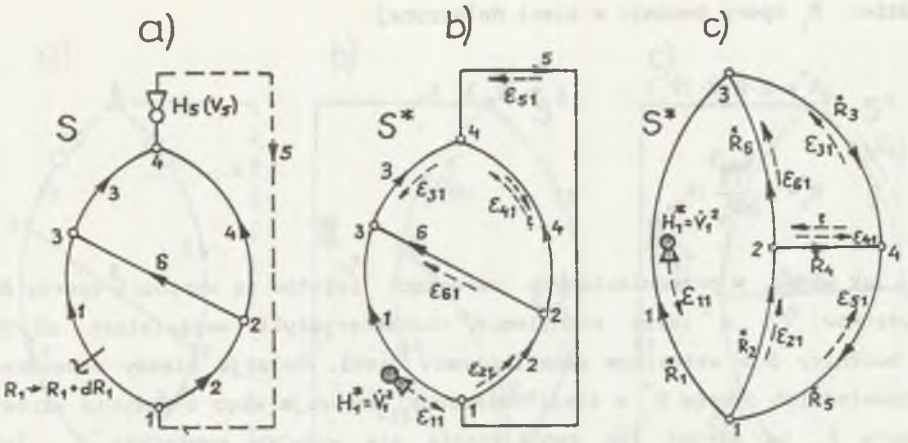
W sieci dołączonej S^* odpowiednia bocznica będzie wtedy posiadała opór nieskończenie duży. Może być usunięta z sieci S^*, co także upraszcza strukturę tej sieci i w niektórych przypadkach ułatwia sprecyzowanie wniosków.

3.7. Analiza wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w sieci przekątnej prostej

W rozdziale 3.5 przedstawiono prawidłowości co do znaków wrażliwości ε_{ir} wydatków powietrza $\dot{V}_i$ przy zmianie oporu r-tej bocznicy występujące w sieciach normalnych. Wrażliwości te były zawsze ujemne dla bocznic należących do drogi zawierającej r-tą bocznicę, a także wrażliwości te były zawsze dodatnie w pozostałych prądach bocznych. Prawidłowości te nie zawsze są słuszne w sieciach przekątnych. Analizę tego zagadnienia rozpoczniemy od najprostszego przykładu sieci przekątnej prostej z jedną bocznicą przekątną (rys. 3.7.1a). Przy prowadzeniu badań przydatne będzie także posługiwanie się siecią dołączoną S^*, która - jak to przedstawiono w rozdz. 3.3 - obrazuje rozchodzenie się elementarnych zmian wydatków powietrza $d\dot{V}_i$ w sieci spowodowanych zmianą dR_r oporu r-tej bocznicy.

Wiadomo, że w sieciach przekątnych kierunki przepływu powietrza w niektórych bocznicach, nawet przy pracy jednego źródła ruchu, są uzależnione od powstałych stosunków ciśnieniowo-oporowych. W ogólnym przypadku dla wielu bocznic bez obliczeń trudno ustalić, jaki będzie kierunek przepływu. Jest to właściwość sieci wynikająca z jej struktury. Ta właściwość sieci przenosi się na sieć dołączoną S^*, która, jak to już wspomniano (rozdz. 3.3), posiada identyczną strukturę co sieć podstawowa. W sieci dołączonej będą więc także występowały bocznice przekątne, dla których kierunek przepływu, czyli znak wrażliwości ε_{ir}, będzie uzależniony od oporów R_i^* bocznic tej sieci. Przekątny charakter bocznic wynika także z położenia źródła wymuszającego przepływ w danej sieci. W sieci dołączonej źródło $H_r^* = -\dot{V}_r^2$ wymuszające przepływy ε_{ir} znajduje się w r-tej bocznicy. W ogólnym przypadku jest to inna bocznica niż bocznica z wentylatorem w sieci podstawowej. W sieci S^* inne bocznice mogą więc posiadać właściwości przekątne. Stosowanie intuicji nie popartej obliczeniami przy wykrywaniu tych bocznic, a tym samym przy rozstrzyganiu o znaku wrażliwości ε_{ir} może być zawodne.

W sieci podstawowej przekątnej prostej (rys. 3.7.1a) w bocznicy 1 zachodzi przyrost oporu tej bocznicy o wartość dR_1. Na rys. 3.7.1b pokazano sieć dołączoną S^* służącą do wyznaczania wrażliwości ε_{i1} wydatków powietrza $\dot{V}_i$ $i = 1,\ldots,6$, wynikających z powstałej zmiany oporu dR_1. W sieci S^* bocznice posiadają opory R_i^* wyznaczone zgodnie ze wzorami (3.2.19), a w bocznicy 1 zainstalowane jest źródło przepływu $H_1^* = -\dot{V}_1^2$. Na rys. 3.7.1c sieć S^* odwzorowano w taki sposób, by uwypuklić znaczenie bocznicy



Rys. 3.7.1. Sieć podstawowa S z jedną bocznicą przekątną (a), sieć dołączona S* przy wyznaczaniu wrażliwości $\mathcal{E}_{11}$ (b,c)

Fig. 3.7.1. Basic network S with one diagonal branch (a), additional network S* used to determine the sensitivity $\mathcal{E}_{11}$ (b,c)

źródłowej 1. Analiza charakteru bocznic względem bocznicy źródłowej 1 wskazuje, że w sieci dołączonej S^* bocznice 2, 3, 5 i 6 są normalne (rys. 3.7.1c). Kierunki przepływu w tych bocznicach w sieci S^*, czyli znaki odpowiednich wrażliwości ε_{1r} są jednoznaczne. Dodatnie wartości ε_{21}, ε_{61} oraz ujemne wartości ε_{31}, ε_{51} (rys. 3.7.1c) są zgodne z oczekiwaniami. Wydatki powietrza w tych bocznicach w sieci podstawowej rys. 3.7.1a odpowiednio rosną oraz ulegają zmniejszeniu wraz ze wzrostem oporu R_1. Bocznica 4 w sieci S^* jest przekątna względem źródła H_1^* zainstalowanego w bocznicy 1. Oznacza to, że znak wrażliwości ε_{41} jest uzależniony od oporów R_i^* pozostałych bocznic. W tym prostym przypadku z jedną bocznicą przekątną 4, w sieci dołączonej S^* bez trudu można sprecyzować odpowiednie warunki na znak wrażliwości ε_{41}, czyli na znak pochodnej dV_4/dR_1 (rys. 3.7.1c):

$$\varepsilon_{41} = \frac{dV_4^*}{dR_1} > 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_6^*}{R_2^*} > \frac{R_3^*}{R_5^*} \tag{3.7.1}$$

$$\varepsilon_{41} = \frac{dV_4^*}{dR_1} = 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_6^*}{R_2^*} = \frac{R_3^*}{R_5^*} \tag{3.7.2}$$

$$\varepsilon_{41} = \frac{dV_1^*}{dR_1} < 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_6^*}{R_2^*} < \frac{R_3^*}{R_5^*}, \tag{3.7.3}$$

gdzie: R_i^* opory bocznic w sieci dołączonej

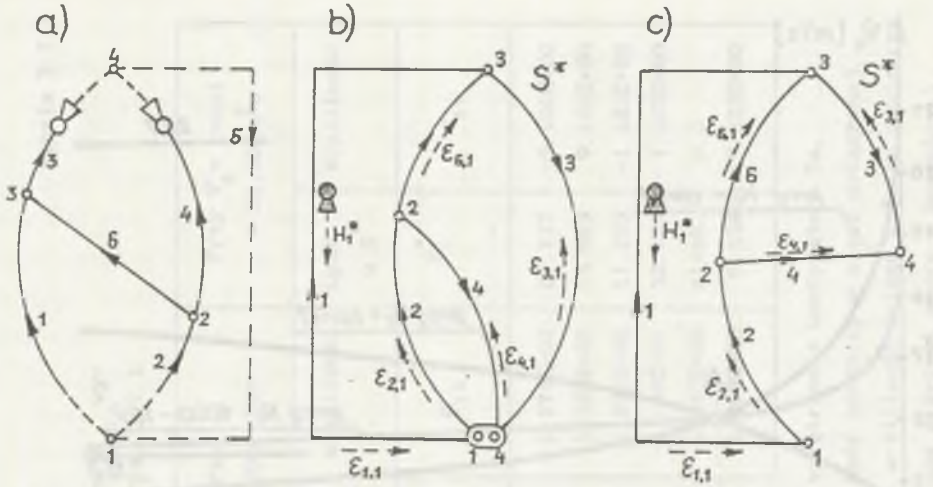
$$R_i^* = 2 \cdot R_i \dot{V}_i |\dot{V}_i| \qquad i = 2, 3, 6,$$

$$R_5^* = -\frac{dH_5}{d\dot{V}_5}(\dot{V}_{5a})$$

Jak widać, w przedstawionych warunkach istotne są wartości oporów R_i, wydatków $\dot{V}_i$, a także nachylenie charakterystyki wentylatora $dH_5/d\dot{V}_5$ w bocznicy 5 w aktualnym punkcie pracy sieci. Relacja między stosunkami odpowiednich oporów R_i^* w sieci dołączonej decyduje więc o wpływie wzrostu oporu R_1 na wzrost lub zmniejszanie się wydatku powietrza $\dot{V}_4$. Taka właściwość niejednoznaczności znaku wrażliwości nie występuje w sieciach normalnych. W sieciach przekątnych oprócz zmian kierunków przepływu powietrza można więc także spodziewać się niejednoznacznych wpływów zmian oporów bocznic na zmiany w rozpływie.

Dodać także należy, że w przypadku gdy wydzielony fragment sieci jest podsiecią, to w przedstawionych warunkach istotne jest nachylenie charakterystyki otoczenia tej podsieci, pełniącego rolę fikcyjnego wentylatora $H_z(\dot{V}_z)$, wymuszającego przepływ w podsieci. W rozdz. 2.6 i 3.6 wspomniano, że charakterystyki otoczeń podsieci mogą posiadać bardzo zróżnicowane współczynniki kątowe tgα, świadczące o niejednakowym nachyleniu charakterystyki do osi $\dot{V}$.

Warto także zwrócić uwagę na znaki wrażliwości ε_{41} w sieci z rys. 3.7.1a w przypadkach, gdy wentylator lub charakterystyka otoczenia reprezentowana przez bocznicę źródłową 5 będzie traktowana jako idealne, niezależne od wydatku źródło przyrostu ciśnienia $H_5 = \text{const}$ lub idealne niezależne od ciśnienia źródło wydatku $\dot{V}_5 = \text{const}$. W rozdz. 3.6 pokazano, że w takich przypadkach opory R_5^* odpowiednich bocznic w sieci dołączonej S^* przyjmują szczególne wartości. Gdy w sieci podstawowej S $H_5 = \text{const}$ (rys. 3.7.1a), to w sieci dołączonej S^* opór $R_5^* = 0$ (rys. 3.7.2b.). Prawa strona wyrażenia (3.7.3) dąży wtedy do nieskończoności, co pociąga za sobą spełnienie warunku $\varepsilon_{41} < 0$. Widać to także w sieci dołączonej, gdzie z uwagi na $R_5^* = 0$ węzły krańcowe 1 4 tej bocznicy można zlepić. Pokazano to na rys. 3.7.2b. Sieć dołączona S^* staje się wtedy normalna, a przepływ ε_{41}, czyli odpowiednia wrażliwość, jest zawsze ujemna. Można to także wytłumaczyć ze stałej różnicy potencjałów powietrza $\phi_1 - \phi_4$. Wraz ze wzrostem oporu R_1 wydatek powietrza $\dot{V}_2$ rośnie, co powoduje, że spadek naporu W_2 wzrasta, a różnica potencjałów $\phi_2 - \phi_4$ maleje. Tym samym wydatek $\dot{V}_4$ zmniejsza się.



Rys. 3.7.2. Przykład sieci przekątnej z dwoma wentylatorami głównymi (a), redukcja sieci dołączonej S• z rys. 3.7.1. przy Hs = const (b), redukcja sieci dołączonej S• z rys. 3.7.1. przy $\dot{V}s$ = const (c)

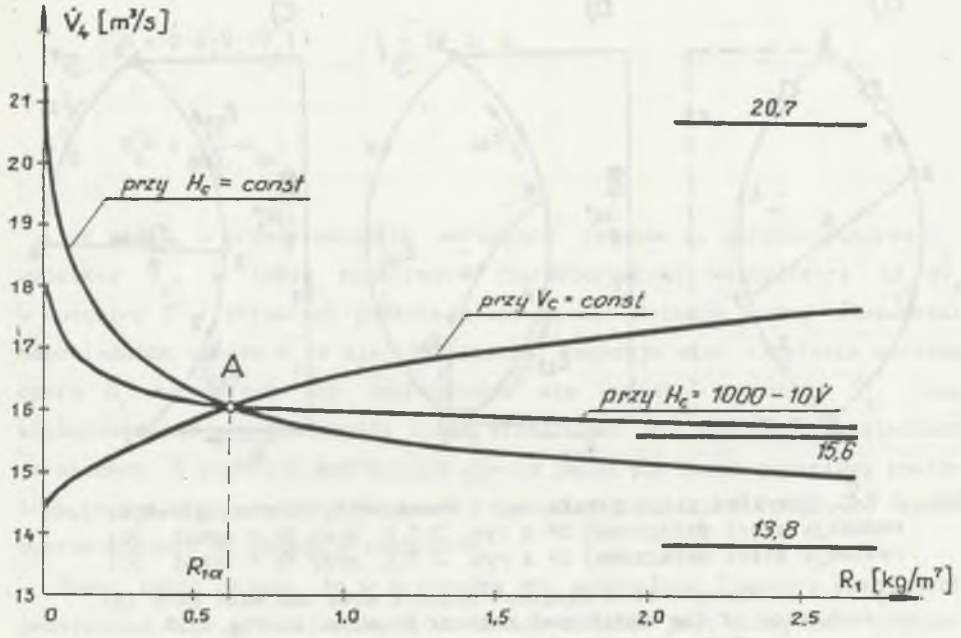
Fig. 3.7.2. Example of a diagonal network with two main fans (a), reduction of the additional network S• shown in Fig. 3.7.1. at H_5 = const (b) and at $\dot{V}_5$ = const (c)

Gdy w sieci podstawowej S $\dot{V}_5$ = const (rys. 3.7.1a), to w sieci dołączonej S^* opór $R_5^* = \infty$ (rys. 3.7.2c). Prawa strona wyrażenia (3.7.1) dąży wtedy do zera, co pociąga za sobą spełnienie warunku $\varepsilon_{41} > 0$. W sieci dołączonej przy $R_5^* = \infty$, bocznicę 5 można odrzucić, co pokazano na rys. 3.7.2c. Sieć dołączona S^* staje się wtedy normalna, a przepływ ε_{41}, czyli odpowiednia wrażliwość, jest zawsze dodatni. Jest to zgodne także z następującą interpretacją tych zależności. Wraz ze wzrostem oporu R_1 (rys. 3.7.1a) maleje wydatek powietrza $\dot{V}_3$, co przy stałym wydatku $\dot{V}_5$ prowadzi do wzrostu $\dot{V}_4$.

Przykłady zależności $\dot{V}_4(R_1)$ uzyskane na podstawie komputerowych obliczeń symulacyjnych rozpływu powietrza w analizowanej sieci pokazano na rys. 3.7.3. Opór R_1 w trakcie obliczeń był zmieniany od zera do nieskończoności. Opory pozostałych bocznic były następujące:

$R_{2a} = 0.25$ kg/m^7, $R_{3a} = 0.16$ kg/m^7, $R_{4a} = 1.0$ kg/m^7, $R_{6a} = 0.3$ kg/m^7.

Przy wentylatorze $H_5 = 486.4$Pa = const zależność $\dot{V}_4(R_1)$ jest malejąca. Przy wentylatorze $\dot{V}_5 = 51.36$ m^3/s = const zależność $\dot{V}_4(R_1)$ jest rosnąca. Na rys. 3.7.3 pokazano także trzecią zależność $\dot{V}_4(R_1)$, uzyskaną z obliczeń, gdzie charakterystykę wentylatora (lub charakterystykę otoczenia podsieci) można było aproksymować równaniem $H = 1000 - 10 \cdot \dot{V}$. W tym przypadku $\dot{V}_4(R_1)$ także jest malejąca i przyjmuje położenie pośrednie.



Rys. 3.7.3. Przykład niejednoznacznej zależności $\dot{V}_4(R_1)$ w sieci przekątnej z rys. 3.7.1

Fig. 3.7.3. Example a non-univocal relation $\dot{V}_4(R_1)$ in the diagonal network presented in Fig. 3.7.1

Zmiana oporu R_1 może oczywiście spowodować zmianę kierunku przepływu $\dot{V}_6$. W analizowanym przykładzie ma to miejsce przy $R_1 = 0.04$ kg/m^7. Zależności $\dot{V}_4(R_1)$ pokazane na rys. 3.7.3 uzyskano więc przy $\dot{V}_6 < 0$ dla $R_1 < 0,04$ kg/m^7 oraz przy $\dot{V}_6 > 0$, gdy $R_1 > 0,04$ kg/m^7. O charakterze zależności $\dot{V}_4(R_1)$ w sąsiedztwie aktualnego punktu pracy sieci można więc wnioskować posiadając informacje o wartościach wrażliwości ε_{41}. Dla wymienionych danych wejściowych oraz przy początkowym (aktualnym) oporze $R_{1a} = 0,64$ kg/m^7, z przeprowadzonych odpowiednich obliczeń rozpływu i wrażliwości uzyskano następujące wartości ε_{41} (wyniki te zestawiono także w tabeli 3.7.1):

- przy pracy w sieci wentylatora o charakterystyce $H_s = 486.4$ Pa = const
  $\varepsilon_{41} = -1.58$ m^{10}/kg·s,
- przy pracy w sieci wentylatora o charakterystyce $H_s = 1000 - 10 \cdot \dot{V}_s$
  $\varepsilon_{41} = -0.52$ m^{10}/kg·s,
- przy pracy w sieci wentylatora o charakterystyce $\dot{V}_s = 51.36$ m^3/s = const
  $\varepsilon_{41} = 1.48$ m^{10}/kg·s.

Tabela 3.7.1

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza i wrażliwości ε_{11} wydatków na przyrost oporu w bocznicy 1 w sieci z rys. 3.7.1

			Parametry bocznic w aktualnym stanie pracy sieci				Przy H_s = const = 486.4 Pa		Przy $H_s = 1000 - 10\dot{V}$		Przy $\dot{V}_s$ = const = 51.36 m^3/s	
							Opór w S^*	Wrażliwość	Opór w S^*	Wrażliwość	Opór w S^*	Wrażliwość
b_i	w_p	w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H_i Pa	R_i^*	ε_{11}	R_i^*	ε_{11}	R_i^*	ε_{11}
1	1	3	640.0	21.18	287.2	0.0	27.117	-1.313E+01	27.117	-1.174E+01	27.117	-9.106E+00
2	1	2	250.0	30.17	227.6	0.0	15.088	3.363E+00	15.089	5.348E+00	15.089	9.106E+00
3	3	4	160.0	35.28	199.1	0.0	11.289	-8.197E+00	11.289	-5.877E+00	11.289	-1.483E+00
4	2	4	1000.0	16.08	258.7	0.0	32.169	-1.577E+00	32.169	-5.199E-01	32.169	1.483E+00
5	4	1	0.0	51.36	0.0	486.4	0.000	-9.774E+00	10.000	-6.397E+00	niesk.	0.0
6	2	3	300.0	14.09	59.5	0.0	8.456	4.941E+00	8.456	5.868E+00	8.456	7.623E+00

b_i - numer bocznicy,
w_p - węzeł początkowy,
w_k - węzeł końcowy,

R_i - opór bocznicy g/m^7,
$\dot{V}_i$ - wydatek powietrza m^3/s,
W_i - spadek naporu Pa,

H_i - spiętrzenie wentylatora Pa,
R_i^* - opór bocznicy w sieci dołączonej,
ε_{11} - wrażliwość i-tego wydatku powietrza na przyrost oporu w bocznicy 1

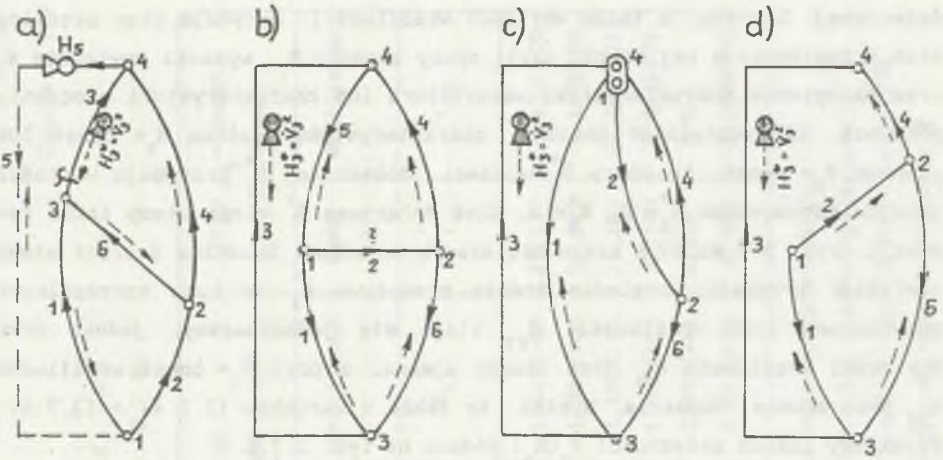
W warunkach (3.7.1) - (3.7.3) dotyczących znaku ε_{41} nie wykluczono także możliwości $\varepsilon_{41} = 0$, co oznacza, że pochodna $d\dot{V}_4/dR_1$ może przyjmować wartość zerową. Sugeruje to możliwość wystąpienia lokalnego ekstremum w zależności $\dot{V}_4(R_1)$. Zagadnienie to będzie poruszone w następnym rozdziale.

W rozdziale 2.9.1 wykazano względność charakteru poszczególnych bocznic przy dolnym położeniu bocznicy źródłowej oraz symetrię macierzy wzajemnego charakteru bocznic. W analizowanym wyżej przykładzie (rys. 3.7.1c) bocznica 4 w sieci dołączonej S^* była przekątna, gdy źródło zaburzające przepływ znajdowało się w bocznicy 1. W rozdz. 3.4 wykazano symetrię znaków macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$. Oznacza to, że gdy zmiana oporu występuje nie w bocznicy 1, lecz w bocznicy 4, to w odpowiedniej sieci dołączonej S^* bocznica 1 będzie przekątna względem bocznicy źródłowej 4. Wrażliwość ε_{14} wydatku $\dot{V}_1$ na zmianę oporu R_4 także nie jest jednoznaczna. Wyprowadzenie odpowiednich warunków co do znaku ε_{14} możliwe jest w taki sam sposób jak to pokazano przy wyprowadzaniu warunków na znak wrażliwości ε_{41}.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w sieci przekątnej prostej wpływ przyrostu oporu na wydatek powietrza w prądzie bocznym, nie należącym do tego samego cyklu-komórki, nie jest jednoznaczny. Znak odpowiedniej wrażliwości uzależniony jest od wielkości charakteryzujących aktualny stan przepływowy w tej sieci (warunki 3.7.1 - 3.7.3).

Sieć dołączona S^* pokazana na rys. 3.7.2b powstaje także z sieci podstawowej S przedstawionej na rys. 3.7.2a. W tym przypadku bocznica 5 w sieci podstawowej S posiada opór $R_5 = 0$. Tym samym opór R_5^* w sieci dołączonej S^* także przyjmuje wartość zero, co upoważnia do zlepienia węzłów 1 4 (rys 3.7.2b). Sieć dołączona S^* staje się wtedy normalna, a wrażliwość ε_{41} jest w tym przypadku zawsze ujemna. Zależność $\dot{V}_4(R_1)$ w sieci na rys. 3.7.2a jest więc zawsze malejąca. Znaki wrażliwości ε_{ir} mogą więc być także uzależnione od sposobu organizacji przewietrzania (kilka szybów wdechowych i wydechowych).

Z przedstawionych prawidłowości zachodzących dla pary bocznic pierwszej i czwartej oraz z symetrii sieci przekątnej prostej (rysunek 3.7.1a) wynika, że identyczna niejednoznaczność znaków wrażliwości dotyczy także pary bocznic drugiej i trzeciej (rysunek 3.7.4a). Na rysunku tym przedstawiono sieć podstawową, w której wzrost oporu o wartość dR_3 występuje w bocznicy 3 oraz pokazano także sieć dołączoną S^*, gdzie w bocznicy 3 zainstalowane jest źródło $H_3^* = -\dot{V}_3^2$ wymuszające przepływy ε_{i3}. Sieć dołączoną S^* przekształcono, by uwypuklić znaczenie bocznicy źródłowej 3 (rysunek 3.7.4b). Kierunki przepływów ε_{i3} w bocznicach 1, 4, 5 i 6 w sieci dołączonej S^* są jednoznaczne, co świadczy o jednoznaczności znaków odpo-



Rys. 3.7.4. Sieć podstawowa S z jedną bocznicą przekątną i dołączona S* przy wyznaczaniu wrażliwości $\mathcal{E}_{13}$ (a,b), redukcja sieci dołączonej S* przy H_5 = const (c), redukcja sieci dołączonej S* przy $\dot{V}_5$ = const (d)

Fig. 3.7.4. Basic network S with one diagonal branch and additional network S* used to determine the sensitivity $\mathcal{E}_{13}$ (a,b), reduction of the additional network S* at H_5 = const (c) and $\dot{V}_5$ = const (d)

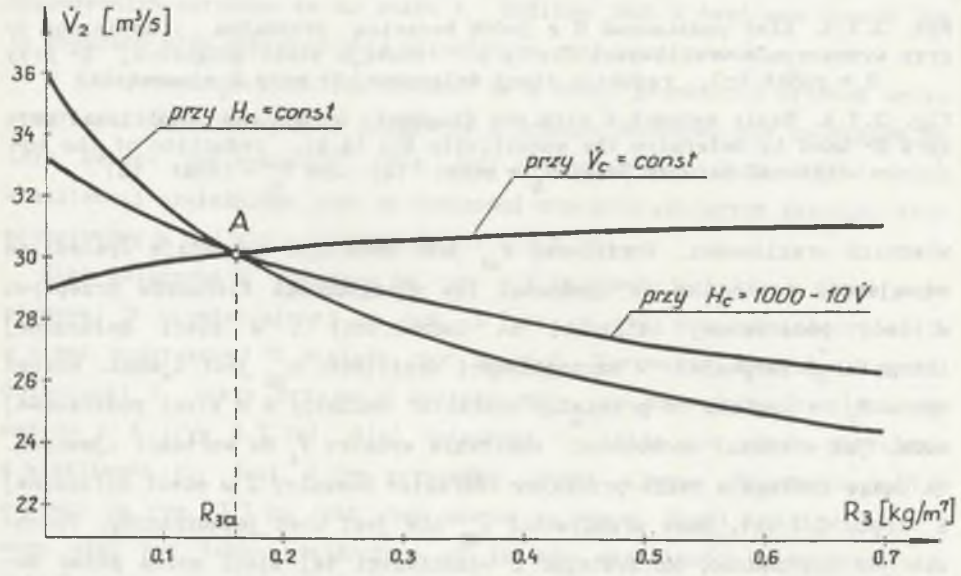
wiednich wrażliwości. Wrażliwość ε_{43} jest dodatnia, pozostałe wymienione są ujemne, co wynika ze zgodności lub niezgodności kierunków przepływu w sieci podstawowej (strzałki na bocznicach) i w sieci dołączonej (strzałki przerywane). W szczególności wrażliwość ε_{62} jest ujemna. Wzrost oporu R_3 ze względu na przekątny charakter bocznicy 6 w sieci podstawowej może, jak wiadomo, spowodować obniżenie wydatku $\dot{V}_6$ do wartości ujemnych. Na uwagę zasługuje także przekątny charakter bocznicy 2 w sieci dołączonej S^* (rys. 3.7.4b). Znak wrażliwości ε_{23} nie jest więc jednoznaczny. Podobnie jak poprzednio, korzystając z właściwości tej sieci można podać warunki na znak wrażliwości ε_{23} (rys. 3.7.4b):

$$\varepsilon_{23} = \frac{d\dot{V}_2}{dR_3} > 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_5^*}{R_1^*} > \frac{R_4^*}{R_6^*} \tag{3.7.4}$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{d\dot{V}_2}{dR_3} = 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_5^*}{R_1^*} = \frac{R_4^*}{R_6^*} \tag{3.7.5}$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{d\dot{V}_2}{dR_3} < 0 \quad \text{gdy} \quad \frac{R_5^*}{R_1^*} < \frac{R_4^*}{R_6^*} \tag{3.7.6}$$

Wielkości R_1^*, podobnie jak poprzednio, są oporami bocznic w sieci dołączonej. O znaku, a także wartości wrażliwości decyduje więc aktualny stan przepływowy w tej sieci, czyli opory bocznic R_1, wydatki powietrza $\dot{V}_1$ oraz nachylenie charakterystyki wentylatora lub charakterystyki otoczenia podsieci. Gdy wentylator posiada charakterystykę poziomą H_5= const lub pionową $\dot{V}_5$= const, to opory R_5^* w sieci dołączonej S^* przyjmują wartości skrajne odpowiednio R_5^*= 0, R_5^*= ∞. Sieć dołączona S^* ulega wtedy także redukcji (rys. 3.7.4c,d) i staje się siecią normalną. Bocznica 2 traci wtedy charakter przekątny względem źródła przepływu H_3^*. W tych szczególnych przypadkach znak wrażliwości ε_{23} staje się jednoznaczny, jednak przy H_5= const wrażliwość ε_{23} jest zawsze ujemna, a przy $\dot{V}_5$= const wrażliwość ε_{23} jest zawsze dodatnia. Wynika to także z warunków (3.7.4) - (3.7.6). Przykłady takich zależności $\dot{V}_2(R_3)$ podano na rys. 3.7.5.



Rys. 3.7.5. Przykład niejednoznacznej zależności $\dot{V}_2(R_3)$ w sieci przekątnej z rys. 3.7.4

Fig. 3.7.5. Example of a non-univocal relation $\dot{V}_2(R_3)$ in the diagonal network in Fig. 3.7.4

Przy nieszczególnej opadającej charakterystyce wentylatora $H_5(\dot{V}_5)$ zależność $\dot{V}_2(R_3)$ będzie przyjmowała przebieg pośredni, co także pokazano na rys. 3.7.5. W aktualnym stanie pracy sieci przy R_{3a} = 0,16 kg/m^7 oraz przy oporach pozostałych bocznic:

R_{1a} = 0.64 kg/m^7, R_{2a} = 0.25 kg/m^7, R_{4a} = 1.0 kg/m^7, R_{6a} = 0.3 kg/m^7

odpowiednie wrażliwości ε_{23} uzyskane z obliczeń przedstawioną metodą są następujące (dane te zestawiono także w tab. 3.7.2):

Tabela 3.7.2

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza i wrażliwości ε_{i3} wydatków na przyrost oporu w bocznicy 3 w sieci z rys. 3.7.4a

			Parametry bocznic w aktualnym stanie pracy sieci				Przy H_s = const = 486.4 Pa		Przy $H_s = 1000 - 10\dot{V}$		Przy $\dot{V}_s$ = const = 51.36 m^3/s	
							Opór w S^*	Wrażliwość	Opór w S^*	Wrażliwość	Opór w S^*	Wrażliwość
b_i	w_p	w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{i3}	R_i^*	ε_{i3}	R_i^*	ε_{i3}
1	1	3	640.0	21.18	287.2	0.0	27.117	-2.272E+01	27.117	-1.629E+01	27.117	-4.113E+00
2	1	2	250.0	30.17	227.6	0.0	15.089	-2.240E+01	15.089	-1.324E+01	15.089	4.113E+00
3	3	4	160.0	35.28	199.1	0.0	11.289	-5.564E+01	11.289	-4.493E+01	11.289	-2.464E+01
4	2	4	1000.0	16.08	258.7	0.0	32.169	1.050E+01	32.169	1.539E+01	32.169	2.464E+01
5	4	1	0.0	51.36	0.0	486.4	0.000	-4.513E+01	10.000	-2.953E+01	niesk.	0.0
6	2	3	300.0	14.09	59.5	0.0	8.456	-3.291E+01	8.456	-2.863E+01	8.456	-2.053E+01

b_i - numer bocznicy,
w_p - węzeł początkowy,
w_k - węzeł końcowy,
R_i - opór bocznicy g/m^7,
$\dot{V}_i$ - wydatek powietrza m^3/s,
W_i - spadek naporu Pa,
H - spiętrzenie wentylatora Pa,
R_i^* - opór bocznicy w sieci dołączonej,
ε_{i3} - wrażliwość i-tego wydatku powietrza na przyrost oporu w bocznicy 3

- przy H_5= const ε_{23}= -22.4 $m^{10}/kg \cdot s$
- przy H_5= 1000-10·$\dot{V}_5$ ε_{23}= -13.2 $m^{10}/kg \cdot s$
- przy $\dot{V}_5$= const ε_{23}= 4.11 $m^{10}/kg \cdot s$

Jak to już wcześniej wyjaśniono, wrażliwości te są współczynnikami kierunkowymi stycznych do odpowiednich zależności $\dot{V}_2(R_3)$ w aktualnym punkcie A pracy sieci (rys. 3.7.5). Posiadanie informacji o wrażliwościach pozwala więc na przewidywanie charakteru zależności $\dot{V}_1(R_r)$. Wielkości te w trakcie obliczeń mogą być także analizowane przez komputer i wykorzystywane w dalszych obliczeniach.

Identyczne uwagi o niejednoznaczności wpływów zmian oporów można także pokazać dla przypadku, gdy zmiana oporu występuje w bocznicy drugiej. W odpowiedniej sieci dołączonej S^* bocznica trzecia jest wtedy przekątna. Znak wrażliwości ε_{23} jest wtedy także uzależniony od oporów bocznic sieci dołączonej. Wyprowadzenie odpowiednich warunków także w tym przypadku jest bardzo proste. Niejednoznaczność ta wynika z wzajemnego przekątnego charakteru bocznic drugiej i trzeciej oraz z symetrii znaków w macierzy wrażliwości E.

Bocznice druga i trzecia w początkowym stanie pracy sieci należą do drogi $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$. Na rys. 3.7.4a jest to droga (wg numerów węzłów) 1 2 3 4. Pokazana niejednoznaczność znaków wrażliwości w sieciach przekątnych może więc dotyczyć także bocznic należących do tej samej drogi. Właściwość taka nie występuje w sieciach normalnych, gdzie jak wiadomo wrażliwości na przyrost oporu dla wszystkich bocznic w drodze są ujemne (przy przyjętych założeniach o pracy wentylatorów na opadającej części charakterystyki).

Przedstawiona analiza znaków wrażliwości w sieci przekątnej prostej nie wyczerpuje zagadnienia niejednoznaczności wrażliwości w sieciach przekątnych. Zagadnienie to będzie przedmiotem analizy w następnych rozdziałach pracy.

3.8. Uwagi o istnieniu niemonotonicznych zależności $\dot{V}_1(R_r)$

W czasie prowadzenia badań wrażliwości stwierdzono, że w niektórych przypadkach dla par bocznic, które względem siebie są przekątne, wrażliwość ε_{1r} związana z zależnością $\dot{V}_1(R_r)$ może zmieniać znak, a także może przyjmować wartość równą zero. Świadczy to o możliwości istnienia w sieciach przekątnych zależności $\dot{V}_1(R_r)$, które nie są monotoniczne. Dotychczas przeprowadzone w pracy badania wskazują, że obserwowana niemonotoniczność nie jest silna. Względne przyrosty lub spadki wydatku powietrza

przyjmowały wartości do kilku procent. W kopalni takie niemonotoniczne zmiany wydatku powietrza spowodowane zmianą oporu innej bocznicy z wielu powodów nie są wykrywalne. Dlatego też można by uważać, że ze względów praktycznych wyjaśnienie takich zależności $\dot{V}_i(R_r)$ nie jest interesujące. W przyszłości można jednak się spodziewać, że sterowanie rozpływem powietrza w kopalni będzie realizowane z wykorzystaniem oczujnikowania sieci i komputerowego przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. W procesie tym uwzględnianie niemonotonicznych przebiegów $\dot{V}_i(R_r)$ może okazać się konieczne ze względu na różne sposoby realizacji sterowania.

Wyjaśnienie w pracy okoliczności związanych z istnieniem przebiegów niemonotonicznych $\dot{V}_i(R_r)$ uznano także za celowe ze względu na sprzeczne informacje na ten temat podane w niektórych publikowanych pracach badawczych [103,105,62].

Zagadnienie postaci zależności $\dot{V}_i(R_r)$ było między innymi przedmiotem obszernej pracy G.K.Riazancewa [103]. W pracy tej analiza teoretyczna "stabilności" i "podatności" na regulację systemu wentylacyjnego kopalni oparta była na wynikach eksperymentu przeprowadzonego przez symulację rozpływu powietrza na komputerze dla sieci pokazanej na rys. 3.8.1a. Riazancew podaje wyniki tych badań w postaci tabel oraz wykresów. Odnośnie do zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dochodzi do wniosku, że z dostateczną dokładnością może być przedstawiona w sposób następujący:

$$q_j = \frac{a}{R_i + K_R} + q_{j\infty} \qquad (3.8.1)$$

Symbole wielkości występujących w tej zależności podajemy za pracą [103], gdzie:

q_j - wydatek powietrza w bocznicy j-tej obserwowanej,

R_i - zmieniany opór bocznicy i-tej,

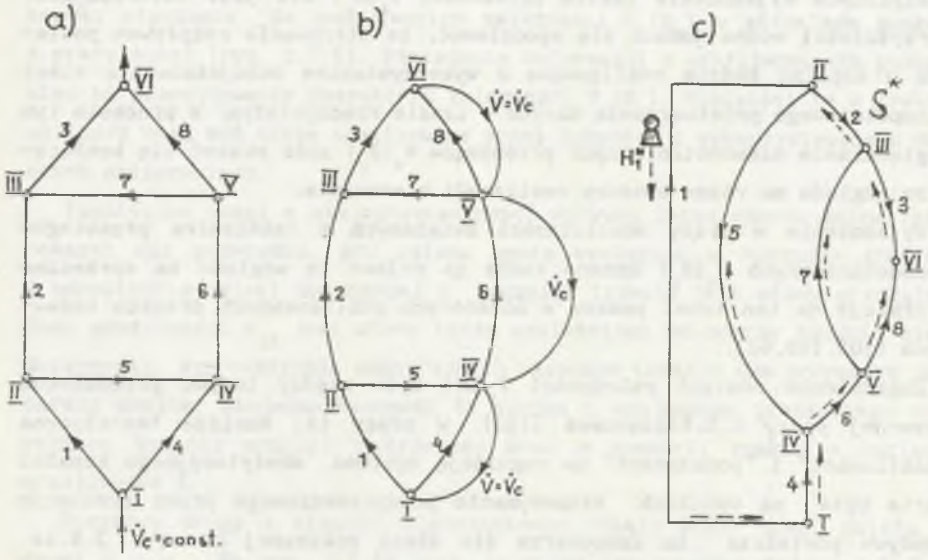
$q_{j\infty}$ - wydatek powietrza w bocznicy j-tej przy oporze $R_i = \infty$,

a, K_r - współczynniki.

Postać zależności (3.8.1), przedstawione wykresy oraz tabele wskazują na występowanie wyłącznie zależności monotonicznych $\dot{V}_i(R_r)$. Riazancew nie wspomina o istnieniu lokalnych ekstremów przy dodatnich oporach bocznic.

Należy jednak zauważyć, że sieć badana przez G.K.Riazancewa (rys. 3.8.1a) przy stałym, przyjętym w pracy [103] wydatku całkowitym $\dot{V}_c = 100\ m^3/s = const$, jest siecią hybrydową. Można wykazać poprawność przekształcenia tej sieci do postaci pokazanej na rys. 3.8.1b, gdzie bocznica zamykająca ze stałym wydatkiem całkowitym została podzielona na trzy bocznice ze stałym wydatkiem $\dot{V} = \dot{V}_c = const$, a węzły krańcowe tych bocznic

zostały zlepione z węzłami drogi I, IV, V, VI. Sieci na rys. 3.8.1a,b opisane są przez taki sam układ równań. Możliwa jest także inna postać tego przekształcenia.



Rys. 3.8.1. Przykład sieci przekątnej z $\dot{V}_c$ = const z pracy Riazancewa (a) hybrydowy charakter tej sieci przy $\dot{V}_c$ = const (b), sieć dołączona S* normalna przy wyznaczaniu wrażliwości $\mathcal{S}_{11}$ (c)

Fig. 3.8.1. Example of a diagonal network with $\dot{V}_c$ = const according to Riazancew (a), thy hybrid character of this network at $\dot{V}_c$ = const (b), normal additional network S* used to determine the sensitivity $\mathcal{S}_{11}$ (c)

W pracach [28,29] zastosowano rozszczepienie wentylatora o stałym spiętrzeniu H = const do uproszczenia niektórych sieci przekątnych, co następnie umożliwiło rozwiązanie tych sieci metodami graficznymi. Pokazane rozszczepienie bocznicy zamykającej ze stałym wydatkiem powietrza $\dot{V}_c$ = const można traktować jako przekształcenie dualne do zastosowanego w artykule [28,29]. Pierwsze takie przekształcenie dualne zostało pokazane w pracy [72]. Sieć na rys. 3.8.1b mimo że zawiera bocznice przekątne piątą i siódmą, składa się z połączeń równoległych i szeregowych bocznic lub fragmentów sieci. Możliwe jest więc także rozwiązanie tej sieci metodą graficzną przedstawioną w pracach [28,29], co obecnie ze względu na inne metody rozwiązywania nie jest już interesujące.

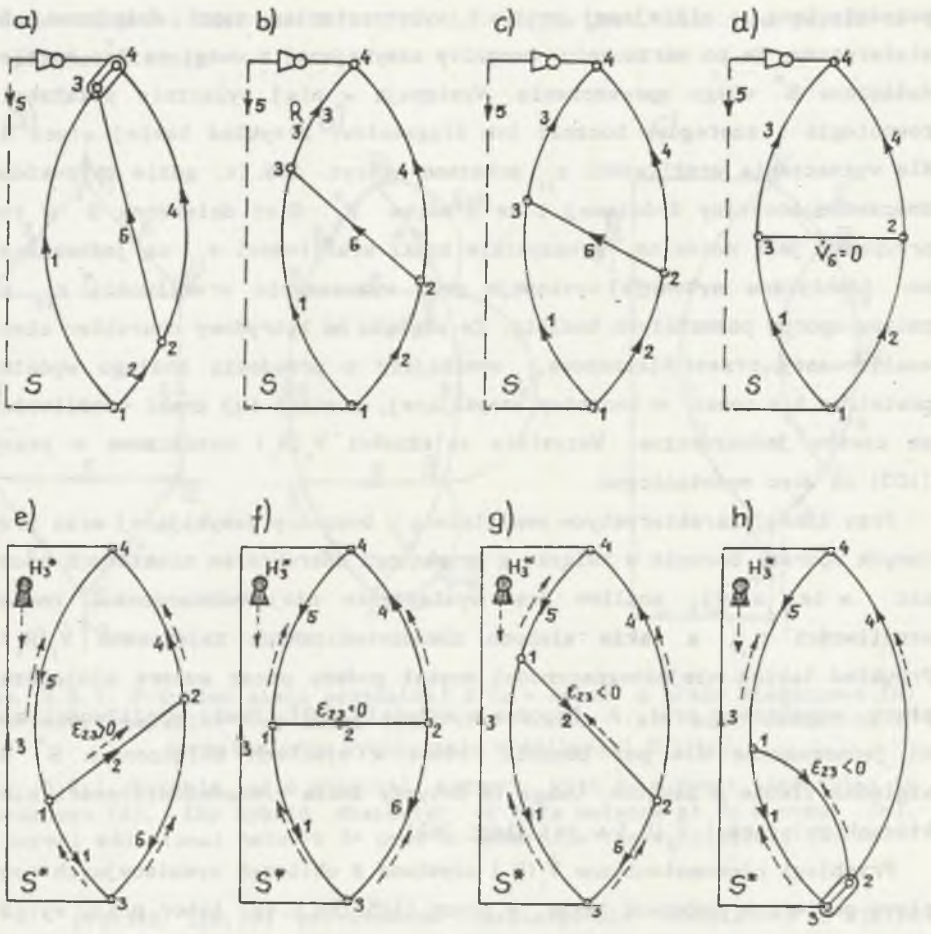
Istotne są jednak właściwości tego typu sieci hybrydowych także w zakresie wzajemnych wpływów bocznic oraz wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów. Przy stałym wydatku powietrza $\dot{V}_c$ = const w bocznicy zamykającej opór odpowiedniej bocznicy w sieci dołączonej S^* przyjmuje wartość

$R^* = \infty$. Patrząc na sieć analizowaną przez Riazancewa (rys. 3.8.1a) metodą przedstawioną w niniejszej pracy z wykorzystaniem sieci dołączonej S^* stwierdzamy, że po odrzuceniu bocznicy zamykającej z uwagi na $R^* = \infty$ sieć dołączona S^* ulega uproszczeniu. Występują w niej wyłącznie połączenia równoległe i szeregowe bocznic lub fragmentów. Przykład takiej sieci S^* dla wyznaczenia wrażliwości ε_{11} pokazano na rys. 3.8.1c, gdzie uwypuklono znaczenie bocznicy źródłowej 1 ze źródłem H_1^*. Sieć dołączona S^* w tym przypadku jest normalna, a wszystkie znaki wrażliwości ε_{11} są jednoznaczne. Identyczna sytuacja występuje przy wyznaczaniu wrażliwości ε_{1r} na zmiany oporów pozostałych bocznic. Ze względu na hybrydowy charakter sieci analizowanej przez Riazancewa, wynikający z przyjęcia stałego wydatku powietrza $\dot{V}_c = \text{const}$ w bocznicy zamykającej, w sieci tej znaki wrażliwości są zawsze jednoznaczne. Wszystkie zależności $\dot{V}_1(R_r)$ wyznaczone w pracy [103] są więc monotoniczne.

Przy innej charakterystyce wentylatora w bocznicy zamykającej oraz przy innych oporach bocznic w związku z przekątnym charakterem niektórych bocznic w tej sieci, możliwe jest wystąpienie niejednoznaczności znaków wrażliwości ε_{1r}, a także słabych niemonotonicznych zależności $\dot{V}_1(R_r)$. Przykład takich niejednoznaczności został podany przez autora niniejszej pracy wspólnie z prof. A. Fryczem w artykule [62]. Znaki wrażliwości nie są jednoznaczne dla par bocznic, które w sieciach dołączonych S^* są względem siebie przekątne. Uwaga ta dotyczy także niemonotoniczności niektórych zależności $\dot{V}_1(R_r)$ w tej sieci [62].

Przebiegi niemonotoniczne $\dot{V}_1(R_r)$ uzyskane z obliczeń symulacyjnych rozpływu powietrza pokazano także w pracy [105 tab.6.4]. Autor pracy wyróżnił istnienie połączenia par bocznic, które nazwał quasi-przekątnymi. Uzyskane zależności niemonotoniczne proponuje aproksymować parabolą [105]. Niektóre uwagi dyskusyjne o wynikach badań przedstawionych w cytowanej pracy, a dotyczące zależności niemonotonicznych, podamy w dalszej części rozdziału.

Możliwość istnienia przebiegów niemonotonicznych $\dot{V}_1(R_r)$ w sieciach przekątnych przedstawimy na przykładzie zależności $\dot{V}_2(R_3)$ w sieci przekątnej prostej (rys. 3.8.2b). Będziemy także wykorzystywać sieć dołączoną S^* sporządzoną do wyznaczania wrażliwości ε_{13} (rys. 3.8.2e, f,g,h). Jak to już pokazano w rozdz. 3.7, przy nieszczególnej charakterystyce wentylatora $H_5(\dot{V}_5)$ pracującego w sieci podstawowej w bocznicy piątej, w sieci dołączonej S^* bocznica druga jest przekątna względem źródła H_3 znajdującego się w bocznicy 3 (rys. 3.8e,f,g,h). W czasie zmian oporu R_3 teoretycznie od $R_3 = 0$ do $R_3 = \infty$ w sieci podstawowej zmienia się rozpływ



Rys. 3.8.2. Ilustracja możliwości istnienia niemonotonicznej zależności $\dot{V}_2(R_3)$

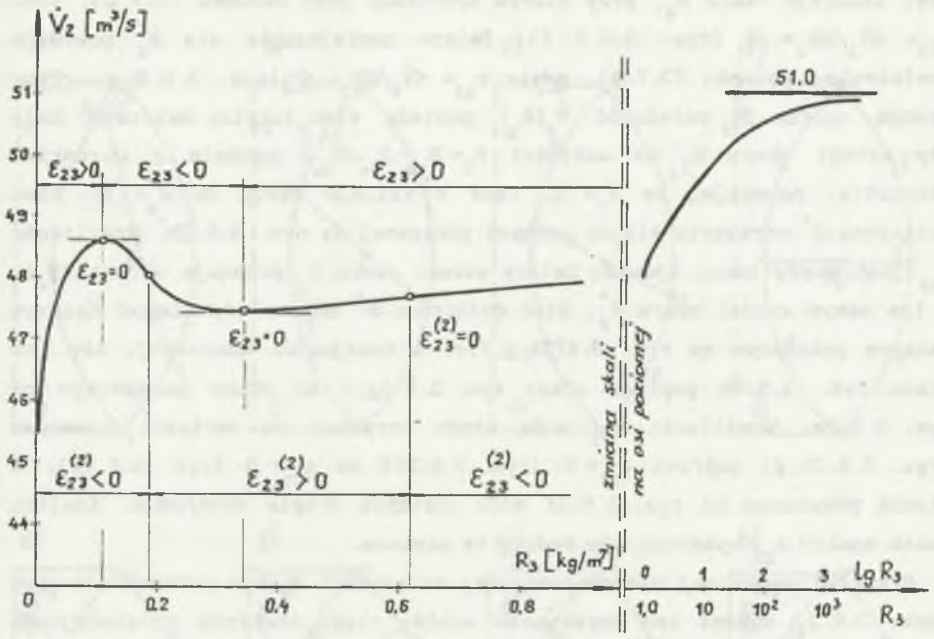
Fig. 3.8.2. Illustration of the possibility of the existence of a non-monotonic relation $\dot{V}_2(R_3)$

powietrza $\dot{V}_1$. Przy stałych oporach pozostałych bocznic oraz przy zmieniających się wydatkach $\dot{V}_1$ opory bocznic R_1^* w sieci dołączonej S^* nie są stałe (zależności 3.2.19). Relacje zachodzące między stosunkami tych oporów (warunki 3.7.4,5,6) mogą więc zmieniać się. W szczególności znacznie zmienia się opór $R_6^* = 2 \cdot R_6 |\dot{V}_6|$, ponieważ wydatek powietrza $\dot{V}_6$ maleje do zera, a następnie $|\dot{V}_6|$ wzrasta. Jeżeli więc przy $\dot{V}_6 > 0$ jest spełniony warunek (3.7.4), to ε_{23} będzie dodatnie, a zależność $\dot{V}_2(R_3)$ jest rosnąca. Ilustruje to rys. 3.8.2e, gdzie w sieci dołączonej S^* $\varepsilon_{23}^* > 0$. Dalszy wzrost R_3 powoduje między innymi obniżenie $\dot{V}_6$, a tym samym R_6^* zmniejsza

się. Istnieje takie R_6^*, przy którym spełniony jest warunek (3.7.5), tzn. $\varepsilon_{23} = d\dot{V}_2/dR_3 = 0$ (rys. 3.8.2 f). Dalsze zmniejszanie się R_6^* powoduje spełnienie warunku (3.7.6), gdzie $\varepsilon_{23} = d\dot{V}_2/dR_3 < 0$ (rys. 3.8.2 g). Przy pewnym oporze R_3 zależność $\dot{V}_2(R_3)$ posiada więc lokalne maksimum. Dalszy wzrost oporu R_3 do wartości $R_3 = R_{1a} \cdot R_{4a}/R_{2a}$, zgodnie z warunkiem Czeczotta, powoduje, że $\dot{V}_6 = 0$. Opór R_6^* maleje wtedy do $R_6^* = 0$. Sieć dołączona S^* upraszcza się do postaci pokazanej na rys. 3.8.2h. Wrażliwość ε_{23} jest wtedy także ujemna. Dalszy wzrost oporu R_3 powoduje wzrost $|\dot{V}_6|$, a tym samym wzrost oporu R_6^*. Sieć dołączona S^* może wtedy ulegać dalszym zmianom pokazanym na rys. 3.8.2h,g,f,e, w kolejności odwrotnej, tzn. od stanu rys. 3.8.2h poprzez stany rys. 3.8.2g,f do stanu pokazanego na rys. 3.8.2e. Wrażliwość ε_{23} może wtedy wzrastać od wartości ujemnych (rys. 3.8.2h,g) poprzez $\varepsilon_{23} = 0$ (rys. 3.8.2f) do $\varepsilon_{23} > 0$ (rys. 3.8.2e). W stanie pokazanym na rys. 3.8.2f może wystąpić drugie ekstremum. Analiza zmian znaków ε_{23} wykazuje, że będzie to minimum.

Przykład omówionej niemonotonicznej zależności $\dot{V}_2(R_3)$ pokazano na rysunku 3.8.3. Wykres ten uzyskano w wyniku ciągu obliczeń symulacyjnych rozpływu powietrza w sieci z rysunku 3.8.2 przy zmienianym oporze R_3 od $R_3 = 0$ do $R_3 = \infty$. Opory pozostałych bocznic w trakcie obliczeń były stałe i wynosiły: $R_1 = 0.064$ kg/m^7, $R_2 = 0.025$ kg/m^7, $R_4 = 0.07$ kg/m^7, $R_6 = 0.30$ kg/m^7.

W bocznicy 5 w czasie obliczeń pracował wentylator o charakterystyce $H_5 = 1000 - 10 \cdot \dot{V}_5$. Zmiana kierunku przepływu powietrza w bocznicy 6 przekątnej w sieci podstawowej występuje przy $R_3 = 0.1792$ kg/m^7. W przedziale oporu R_3 od $R_3 = 0$ do $R_3 < 0.103$ kg/m^7 wydatek powietrza $\dot{V}_2$ rośnie od 45.5 m^3/s do 48.6 m^3/s (rys. 3.8.3). Wrażliwość ε_{23} jest wtedy dodatnia. Spełniony jest wąrunek (3.7.4). W sieci dołączonej S^* kierunki przepływów ε_{13} pokazane są na rys. 3.8.2e. Przy $R_3 = 0.103$ kg/m^7 wrażliwość $\varepsilon_{23} = 0$. Spełniony jest warunek (3.7.5). Sieć dołączona S^* dla tego stanu pokazana jest na rys. 3.8.2f. Dla 0.103 kg/m$^7 < R_3 < 0.343$ kg/m^7 $\dot{V}_2$ maleje do 47.5 m^3/s. Wrażliwość ε_{23} jest wtedy ujemna. Spełniony jest warunek (3.7.6). Sieć dołączona S^* przedstawiona jest kolejno na rysunkach: 3.8.2f, 3.8.2h (wtedy $\dot{V}_6 = 0$, $R_6^* = 0$), dalej ponownie na rys. 3.8.2g (wtedy $\dot{V}_6 < 0$, $|\dot{V}_6| > 0$, $R_6^* > 0$). Przy $R_3 = 0.343$ kg/m^7 ponownie jest spełniony warunek (3.7.5), więc $\varepsilon_{23} = 0$. Zależność $\dot{V}_2(R_3)$ osiąga wtedy minimum. W sieci dołączonej S^* stan ten pokazany jest na rys. 3.8.2f. Dla $R_3 > 0{,}343$ kg/m^7 $\dot{V}_2(R_3)$ rośnie i przy $R_3 = \infty$ osiąga wartość $\dot{V}_2 = 51.0$ m^3/s (rys. 3.8.3). Wrażliwość ε_{23} w tym przedziale jest dodatnia. Spełniony jest warunek (3.7.4). Przepływ ε_{23} w sieci dołączonej S^* pokazany jest na rys. 3.8.2e.



Rys. 3.8.3. Przykład niemonotonicznej zależności $\dot{V}_2(R_3)$ w sieci z rys. 3.8.2

Fig. 3.8.3. Example of the non-monotonic relation $\dot{V}_2(R_3)$ in the network presented in Fig. 3.8.2

Na rys. 3.8.3 zaznaczono także przedziały, w których wrażliwość drugiego rzędu $\varepsilon_{23}^{(2)}$ przyjmuje wartości ujemne, równe 0 oraz dodatnie. Sposób wyznaczania tej wrażliwości $\varepsilon_{1r}^{(2)}$ podany zostanie w następnych rozdziałach.

Pokazana słaba niemonotoniczna zależność $\dot{V}_2(R_3)$ nie zawsze występuje w tej sieci. Jest to uzależnione od wartości oporów pozostałych bocznic oraz od przebiegu charakterystyki wentylatora $H_5(\dot{V}_5)$. Identyczne uwagi można przedstawić odnośnie do zależności $\dot{V}_3(R_2)$, a także $\dot{V}_4(R_1)$, $\dot{V}_1(R_4)$, ponieważ wymienione pary bocznic w odpowiednich sieciach dołączonych są względem siebie przekątne. Przykład niemonotonicznej zależności $\dot{V}_4(R_1)$ w sieci z rys. 3.7.1 podano w pracy [62].

Przeprowadzona analiza wskazuje, że takie nietypowe słabe niemonotoniczne zależności $\dot{V}_1(R_r)$ mogą występować w sieciach przekątnych dla bocznic, które w odpowiedniej sieci dołączonej S^* są przekątne względem źródła H_r^* pracującego w r-tej bocznicy oraz gdy zachodzą duże zmiany oporów R_1^* w sieci S^*, powodujące wystąpienie zmiany znaku ε_{1r}. W praktyce w czasie pomiarów w kopalni wspomniana niemonotoniczność prawdopodobnie nie jest zauważalna ze względu na małe, kilkuprocentowe zmiany wydatku $\dot{V}_1(R_r)$.

Stwierdzenie tego faktu może być jednak istotne w obliczeniach numerycznych zmierzających do uzyskania wybranego optymalnego stanu przepływowego w sieci.

W pracy [105 tab. 6.4 rys. 6.1] pokazano wyniki obliczeń zależności $\dot{V}_i(R_r)$ wskazujące na występowanie w tych zależnościach lokalnego ekstremum. Wyniki te dotyczą niektórych par bocznic posiadających wspólny węzeł. Autor pracy [105] nazwał takie połączenia bocznic quasi-przekątnymi. Analiza danych z pracy [105 tab. 6.4 rys. 6.1] metodą przedstawioną w niniejszej pracy z wykorzystaniem sieci dołączonej S^* wskazuje, że podane przykłady zależności niemonotonicznych dla bocznic posiadających wspólny węzeł nie są możliwe. Bocznice posiadające wspólny węzeł w sieci dołączonej S^* są względem siebie normalne, a tym samym znaki wrażliwości ε_{ir} są jednoznaczne (dodatnie lub ujemne). Nie jest więc możliwe, by wrażliwość w takich przypadkach zmieniała znak, a tym samym by pokazane w pracy [105] zależności $\dot{V}_i(R_r)$ były niemonotoniczne.

3.9. Wyznaczanie wrażliwości drugiego rzędu $\varepsilon_{ir}^{(2)}$

Przy opisie zależności $\dot{V}_i(R_r)$, a także w procesie sterowania rozpływem powietrza w kopalni oprócz wrażliwości ε_{ir} mogą być także przydatne wrażliwości wyższych rzędów $\varepsilon_{ir}^{(n)}$. Pokażemy sposób wyznaczania wrażliwości drugiego rzędu $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ wydatków powietrza $\dot{V}_i$ $i = 1,2,\ldots,m$ na zmianę jednego wybranego r-tego oporu R_r. Wrażliwości te będą oczywiście wartościami drugiej pochodnej $d^2\dot{V}_i/dR_r^2$, obliczonymi w aktualnym stanie pracy sieci.

W rozdz. 3.2 układ równań (3.2.18) po wstawieniu wielkości charakteryzujących aktualny stan pracy sieci został potraktowany jako liniowy układ równań algebraicznych z niewiadomymi wartościami ε_{ir}. Układ ten (3.2.18) może być jednak nadal traktowany jak układ równań funkcyjnych. Po ponownym zróżniczkowaniu względem R_r z równań (3.2.18a,b) otrzymuje się:

$$\sum_{i=1}^{m} s_{ji} \cdot \frac{d^2\dot{V}_i}{dR_r^2} = 0 \qquad j = 1,2,\ldots,n-1 \qquad (3.9.1)$$

$$\sum_{i=1}^{m} c_{ki} \cdot \frac{d^2W_i}{dR_r^2} = 0 \qquad k = 1,2,\ldots,\nu \qquad (3.9.2)$$

Ponowne zróżniczkowanie względem R_r równań (3.2.18c,d,e) opisujących charakterystyki elementów sieci prowadzi do następujących zależności:

- dla bocznic pasywnych i = 1,2,...,m i ≠ r

$$\frac{d^2W_i}{dR_r^2} = 2\cdot R_i\cdot \operatorname{sgn}\dot{V}_i\cdot\left(\frac{d\dot{V}_i}{dR_r}\right)^2 + 2\cdot R_i\cdot|\dot{V}_i|\cdot\frac{d^2\dot{V}_i}{dR_r^2} \qquad (3.9.3)$$

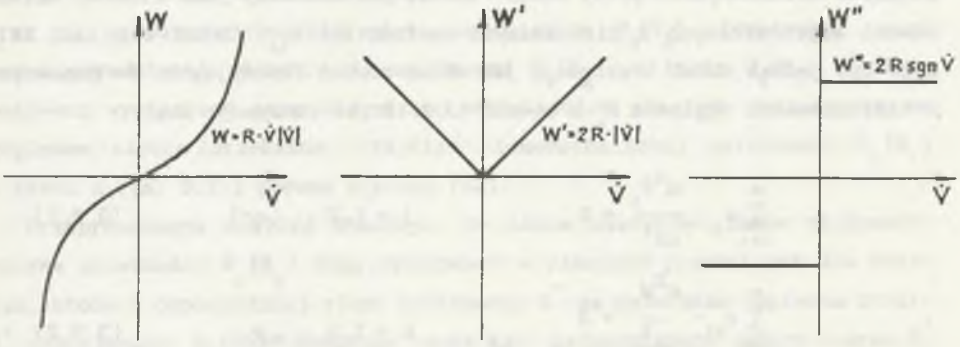
- dla bocznicy r-tej przy założeniu, że $\dot{V}_r > 0$

$$\frac{d^2W_r}{dR_r^2} = 4\cdot\dot{V}_r\cdot\frac{d\dot{V}_r}{dR_r} + 2\cdot R_r\cdot\left(\frac{d\dot{V}_r}{dR_r}\right)^2 + 2\cdot R_r\cdot\dot{V}_r\cdot\frac{d^2\dot{V}_r}{dR_r^2} \qquad (3.9.4)$$

- dla bocznic z wentylatorem:

$$\frac{d^2W_r}{dR_r^2} = -\frac{d^2H_i}{d\dot{V}_i^2}\cdot\left(\frac{d\dot{V}_i}{dR_r}\right)^2 - \frac{dH_i}{d\dot{V}_i}\cdot\frac{d^2\dot{V}_i}{dR_r^2} \qquad (3.9.5)$$

Wyznaczanie drugich pochodnych możliwe jest jednak pod warunkiem, że pierwsze pochodne są różniczkowalne. Przy przyjętych założeniach upraszczających oraz przy stosowanym opisie charakterystyk elementów pasywnych (bocznic z oporem) w postaci $W_i = R_i\dot{V}_i|\dot{V}_i|$ wymieniony warunek nie jest spełniony dla $\dot{V}_i = 0$ (rysunek 3.9.1). Wynika to z nieróżniczkowalności pierwszej pochodnej wymienionej zależności przy $\dot{V}_i = 0$. Druga pochodna nie jest wtedy ciągła (rys. 3.9.1c). W sytuacji, gdy jakiś wydatek powietrza w sieci ulega zatrzymaniu, w stosowanym opisie matematycznym sieci można więc spodziewać się osobliwości, która objawia się nieciągłością drugiej pochodnej $\varepsilon_{ir}^{(2)} = \frac{d^2\dot{V}_i}{dR_r^2}$. Osobliwość ta wynika z niedoskonałości stosowanego



Rys. 3.9.1. Charakterystyka elementu pasywnego w sieci oraz jej pierwsza i druga pochodna

Fig. 3.9.1. Characteristics of a passive element in the network and its first and second derivative

opisu matematycznego charakterystyk elementów sieci. Poprawność wyników obliczeń wrażliwości $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ w otoczeniu punktu pracy sieci, w którym jakiś wydatek powietrza ulega zatrzymaniu, jest wtedy problematyczna. W pozostałych przypadkach uzyskuje się prawidłowe wartości $\varepsilon_{ir}^{(2)}$, które mogą być przydatne w obliczeniach sieciowych.

Podobnie jak w rozdziale 3.2 wprowadzimy następujące podstawienia pomocnicze:

$$R_i^* = \begin{cases} 2 \cdot R_i \cdot |\dot{V}_{ia}| & \text{dla bocznic z oporem} \quad (3.9.6) \\ -\dfrac{dH_i}{d\dot{V}_i}(\dot{V}_{ia}) & \text{dla bocznic z wentylatorem} \quad (3.9.7) \end{cases}$$

$$\frac{d^2\dot{V}_i}{dR_r^2} = \varepsilon_{ir}^{(2)} \qquad i = 1,2,\ldots,m \qquad (3.9.8)$$

$$a_i^* = \begin{cases} 2 \cdot R_i \cdot \operatorname{sgn}\dot{V}_i \cdot \left(\dfrac{d\dot{V}_i}{dR_r}\right)^2 & \text{dla bocznic z oporem} \quad (3.9.9) \\ & i = 1,2,\ldots,m \quad i \neq r \\ 4 \cdot \dot{V}_r \cdot \dfrac{d\dot{V}_r}{dR_r} + 2 \cdot R_r \cdot \left(\dfrac{d\dot{V}_r}{dR_r}\right)^2 & i = r \quad (3.9.10) \\ -\dfrac{d^2H_i}{d\dot{V}_i^2} \cdot \left(\dfrac{d\dot{V}_i}{dR_r}\right)^2 & \text{dla bocznic z wentylatorem} \quad (3.9.11) \end{cases}$$

Wyeliminowanie wielkości $\dfrac{d^2W_i}{dR_r^2}$ oraz wprowadzenie proponowanych podstawień po uporządkowaniu prowadzi do następującego układu równań:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m} s_{ji} \cdot \varepsilon_{ir}^{(2)} = 0 & j = 1,2,\ldots,n-1 \quad (3.9.12) \\ \sum_{i=1}^{m} c_{ki} \cdot R_i^* \cdot \varepsilon_{ir}^{(2)} = -\sum_{i=1}^{m} c_{ki} \cdot a_i^* & k = 1,2,\ldots,\nu \quad (3.9.13) \end{cases}$$

Układ ten ponownie będziemy traktowali jako algebraiczny układ równań liniowych z niewiadomymi wartościami $\varepsilon_{ir}^{(2)}$. Wielkości a_i^* (podstawienia 3.9.9, 10, 11) traktować będziemy jako wartości znane z aktualnego stanu pracy sieci oraz z wcześniejszych obliczeń wrażliwości pierwszego rzędu ε_{ir}. Liczba równań wynosi także m i jest równa liczbie niewiadomych $\varepsilon_{ir}^{(2)}$.

Uzyskanie rozwiązania tego układu możliwe jest znanymi metodami rozwiązywania układów równań liniowych. Dla dużych sieci konieczne jest wykorzystanie komputerów. W pracy sporządzono odpowiedni program przygotowujący dane wejściowe do obliczeń $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ na podstawie wyników obliczeń aktualnego rozpływu powietrza w sieci oraz wrażliwości ε_{ir}. Program ten rozwiązuje także przygotowany układ równań (3.9.12, 13) i wyznacza poszukiwane wrażliwości $\varepsilon_{ir}^{(2)}$.

Poprawność przedstawionej metody oraz programu komputerowego wyznaczania wrażliwości $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ sprawdzona została innymi obliczeniami. Z metody przyrostowej wrażliwość $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ może być w przybliżony sposób wyznaczona z ilorazu różnicowego $\Delta\varepsilon_{ir}/\Delta R_r$. W niektórych przypadkach możliwe jest wyprowadzenie z równań równowagi sieci zależności $\dot{V}_i(R_r)$, a tym samym obliczenie wartości pierwszej pochodnej $d\dot{V}_i/dR_r$ oraz wartości drugiej pochodnej $d^2\dot{V}_i/dR_r^2$. Przeprowadzone obliczenia porównawcze potwierdziły poprawność przedstawionej metody oraz programu obliczania $\varepsilon_{ir}^{(2)}$.

Badania wrażliwości drugiego rzędu $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ dla sieci normalnych wykazały, że znak tej wrażliwości podobnie jak znak ε_{ir} jest zawsze jednoznaczny. Stwierdzono także, że znaki ε_{ir} oraz $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ są zawsze przeciwne. Potwierdza to wcześniej przypomniany znany wniosek (rozdz. 3.5) o regularności zależności $\dot{V}_i(R_r)$ w sieciach normalnych. W sieciach przekątnych (rozdz. 3.7, 3.8) mogą występować słabe zależności niemonotoniczne $\dot{V}_i(R_r)$ rys. 3.8.3. Przy identyfikacji takich zależności może być pomocna $\varepsilon_{ir}^{(2)}$.

Na rys. 3.8.3 przy analizie niemonotonicznej zależności $\dot{V}_2(R_3)$ w sieci z rys. 3.8.2b pokazano przedziały, w których $\varepsilon_{23}^{(2)}$ jest dodatnie oraz ujemne. Występują przedziały w zależności $\dot{V}_2(R_3)$, gdzie znaki ε_{23}, $\varepsilon_{23}^{(2)}$ są przeciwne, a także przedziały, gdzie znaki tych wrażliwości są takie same. Stwierdzenie w czasie obliczeń jednakowych znaków ε_{ir}, $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ w wybrannej zależności $\dot{V}_i(R_r)$ upoważnia do wyciągnięcia wniosku, że jest to zależność niemonotoniczna. Wniosek ten może być przydatny przy opracowywaniu algorytmów sterowania rozpływem powietrza w kopalni lub algorytmów niektórych obliczeń sieciowych.

Wspomniana nieciągłość wrażliwości $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ wynikająca ze stosowanego opisu charakterystyk $W_i(\dot{V}_i)$ dla bocznic z oporem, w zależności $\dot{V}_2(R_3)$ na rys. 3.8.3, występuje przy oporze $R_3 = 0.1792$, przy którym wydatek powietrza $\dot{V}_6$ w sieci na rys. 3.8.2d ulega zatrzymaniu. Wrażliwość $\varepsilon_{23}^{(2)}$ w sposób skokowy przechodzi wtedy z wartości ujemnych na dodatnie. Stosownych wykresów ilustrujących to zagadnienie nie podajemy.

3.10. Jednoznaczność znaków wrażliwości w cyklach-komórkach sieci płaskich

Przedstawione w poprzednich rozdziałach metody wyznaczania wrażliwości ε_{ir}, $\varepsilon_{ir}^{(2)}$ pozwalają na rozstrzyganie o charakterze zależności $\dot{V}_i(R_r)$. Możliwe jest to przez wykonanie odpowiednich obliczeń wrażliwości, w których wykorzystuje się aktualny stan pracy sieci oraz rozpływ powietrza z tego aktualnego stanu sięci. Wyniki tych obliczeń, jak to już wspomniano, mogą być przechowywane w pamięci komputera i wykorzystywane w następnych obliczeniach zmierzających do wypracowania wybranego optymalnego stanu przepływowego w kopalni.

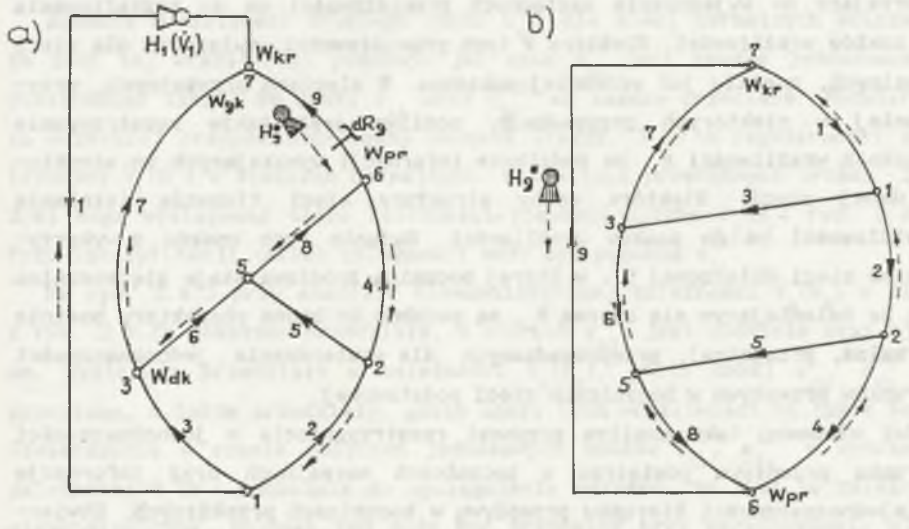
Zdaniem autora interesujące są także dalsze badania w tym zakresie, zmierzające do wyjaśnienia następnych prawidłowości co do kształtowania się znaków wrażliwości. Niektóre z tych prawidłowości, zwłaszcza dla sieci normalnych, zostały już wcześniej pokazane. W sieciach przekątnych, przynajmniej w niektórych przypadkach, możliwe jest także rozstrzyganie o znakach wrażliwości ε_{ir} na podstawie informacji wynikających ze struktury danej sieci. Niektóre cechy struktury sieci tłumaczą istnienie prawidłowości co do znaków wrażliwości. Badania tych znaków z wykorzystaniem sieci dołączonej S^*, w której bocznicą źródłową staje się bocznica r-ta ze zmieniającym się oporem R_r, są podobne do badań charakteru bocznic (normalna, przekątna), przeprowadzanych dla stwierdzenia jednoznaczności kierunków przepływu w bocznicach sieci podstawowej.

Jak wiadomo, taka analiza przynosi rozstrzygnięcia o jednoznaczności kierunku przepływu powietrza w bocznicach normalnych oraz informację o niejednoznaczności kierunku przepływu w bocznicach przekątnych. Stwierdzenie konkretnego kierunku przepływu w bocznicach przekątnych przynoszą dopiero dalsze obliczenia rozwiązania sieci. Przy badaniu znaków wrażliwości ε_{ir}, czyli kierunków przepływu w sieci dołączonej S^*, można więc wykorzystać znane metody badania charakteru bocznic. Sieć dołączona S^* nie jest jednak siecią samoistną. Powstała z sieci podstawowej S. O znakach wrażliwości ε_{ir}, będą więc decydować właściwości obydwu sieci, tzn. podstawowej S i dołączonej S^*.

Badania znaków wrażliwości ε_{ir} z analizy struktury sieci można prowadzić przy założeniu, że nie są znane kierunki przepływu powietrza w sieci podstawowej, a także przy założeniu, że posiadamy informacje o tych kierunkach. Przypadek pierwszy posiada charakter bardzo ogólny. Zdaniem auto-

ra dla praktyki bardziej przydatne będą wyniki uzyskane przy drugim wymienionym założeniu. Badania wrażliwości w sieci istniejącej, przy znanych kierunkach przepływu powietrza, przynoszą informacje o możliwych zmianach w sieci, wychodzących poza aktualny stan przepływowy pracy tej sieci.

W niniejszym rozdziale zwrócimy uwagę na prawidłowości co do znaków wrażliwości ε_{ir} w cyklach-komórkach w sieciach płaskich, w cyklach nie będących komórkami w tych sieciach oraz w cyklach w sieciach niepłaskich. Prawidłowość ta dla sieci płaskich zredukowanych może być sprecyzowana w sposób następujący: wzrost oporu R_r w r-tej bocznicy wywołuje jednoznaczne co do znaku zmiany wydatków powietrza w bocznicach związanych z węzłami: początkowym w_{pr} i końcowym w_{kr} bocznicy r-tej oraz w bocznicach należących do dwu cykli-komórek, do których należy r-ta bocznica (rys. 3.10.1a,b). Wymienione bocznice są bowiem normalne w sieci dołączonej S^* względem r-tej bocznicy źródłowej w tej sieci (rozdz. 2.9.1).



Rys. 3.10.1. Jednoznaczność znaków wrażliwości ε_{ir} w cyklach-komórkach sieci płaskiej

Fig. 3.10.1. The univocal character of the signs of sensitivity ε_{ir} in the cell-cycles of a flat network

Znaki wrażliwości ε_{ir} w tych dwu zbiorach bocznic są więc jednoznaczne, przy czym:

- ε_{ir} jest ujemne dla bocznic b_i:
  - posiadających orientację "do węzła w_{pr}",
  - posiadających orientację "od węzła w_{kr}",
  - należących do tej samej drogi w cyklu-komórce $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$ (węzeł dolny komórki, węzeł górny komórki) co bocznica r-ta,

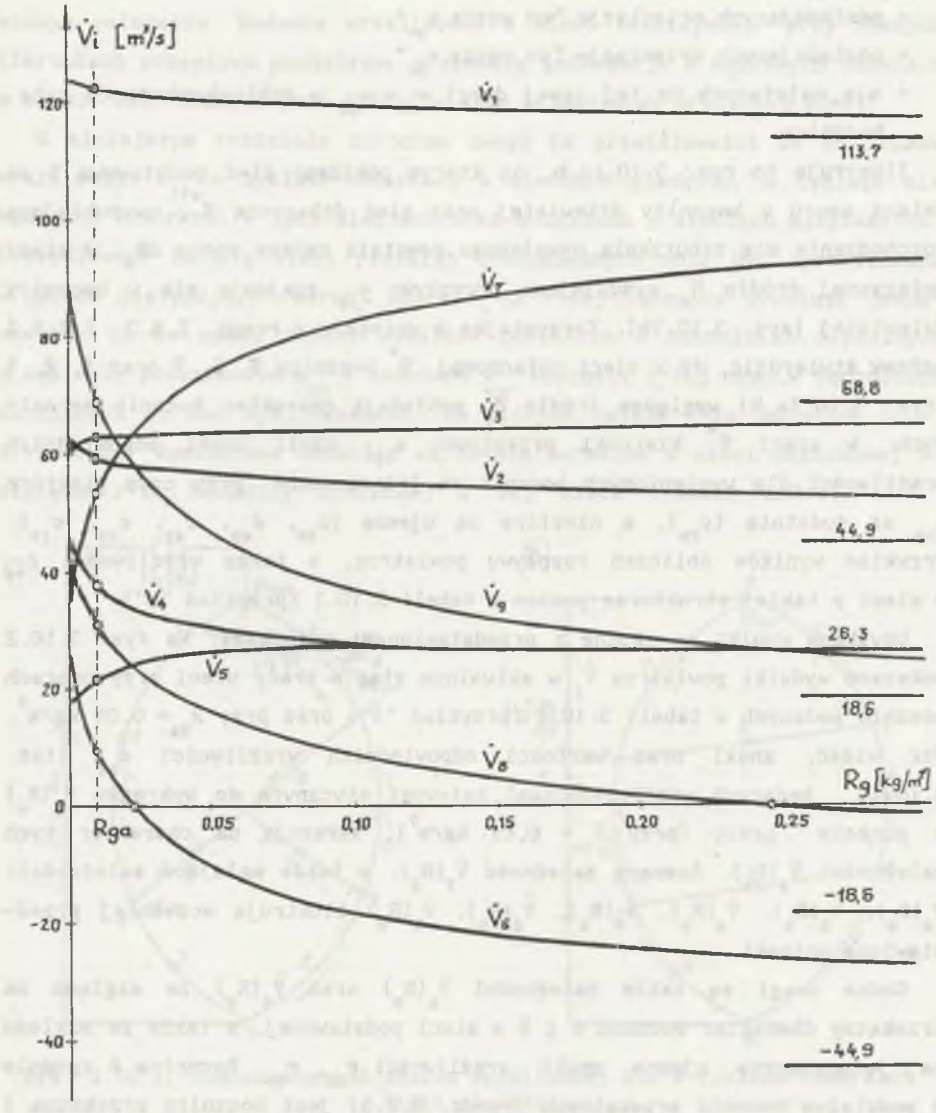
- ε_{ir} jest dodatnie dla bocznic b_i:
  - posiadających orientację "od węzła w_{pr}",
  - posiadających orientację "do węzła w_{kr}",
  - nie należących do tej samej drogi $w_{dk} \rightarrow w_{gk}$ w cyklu-komórce co r-ta bocznica.

Ilustruje to rys. 3.10.1a,b, na którym pokazano sieć podstawową S ze zmianą oporu w bocznicy dziewiątej oraz sieć dołączoną S^*, uwypuklającą rozchodzenie się zaburzenia wywołanego powstałą zmianą oporu dR_9. W sieci dołączonej źródło H_9^* wymuszające przepływy ε_{19} znajduje się w bocznicy dziewiątej (rys. 3.10.1b). Korzystając z wniosków z rozdz. 2.8.3 i 2.9.1 możemy stwierdzić, że w sieci dołączonej S^* bocznice 8, 6, 7 oraz 4, 2, 1 (rys. 3.10.1a,b) względem źródła H_9^* posiadają charakter bocznic normalnych. W sieci S^* kierunki przepływów ε_{19}, czyli znaki odpowiednich wrażliwości dla wymienionych bocznic są jednoznaczne, przy czym niektóre ε_{19} są dodatnie (ε_{79}), a niektóre są ujemne (ε_{89}, ε_{69}, ε_{49}, ε_{29}, ε_{19}). Przykład wyników obliczeń rozpływu powietrza, a także wrażliwości ε_{19} w sieci o takiej strukturze podano w tabeli 3.10.1 (przykład "a").

Uzyskane wyniki są zgodne z przedstawionymi wnioskami. Na rys. 3.10.2 pokazano wydatki powietrza $\dot{V}_i$ w aktualnym stanie pracy sieci przy oporach bocznic podanych w tabeli 3.10.1 (przykład "a") oraz przy $R_{9a} = 0{,}01\ kg/m^7$. Jak widać, znaki oraz wartości odpowiednich wrażliwości ε_{19} (tab. 3.10.1), będących współczynnikami kątowymi stycznych do wykresów $\dot{V}_i(R_9)$ w punkcie pracy (przy $R_{9a} = 0{,}01\ kg/m^7$), wskazują na charakter tych zależności $\dot{V}_i(R_9)$. Rosnąca zależność $\dot{V}_7(R_9)$, a także malejące zależności: $\dot{V}_9(R_9)$, $\dot{V}_8(R_9)$, $\dot{V}_6(R_9)$, $\dot{V}_4(R_9)$, $\dot{V}_2(R_9)$, $\dot{V}_1(R_9)$ ilustrują wcześniej przedstawione wnioski.

Godne uwagi są także zależności $\dot{V}_6(R_9)$ oraz $\dot{V}_8(R_9)$ ze względu na przekątny charakter bocznic 6 i 8 w sieci podstawowej, a także ze względu na jednoznaczne, ujemne znaki wrażliwości ε_{69}, ε_{89}. Bocznica 6 zgodnie z podziałem bocznic przekątnych (rozdz. 2.8.5) jest bocznicą przekątną I rodz., a bocznica 8 III rodz. W obydwu tych bocznicach wraz ze wzrostem oporu R_9 występuje zmiana kierunku przepływu, przy czym wraz ze stopniowym wzrostem R_9 (rys. 3.10.2) najpierw odwróceniu ulega wydatek powietrza $\dot{V}_6$, a następnie wydatek powietrza $\dot{V}_8$. Kolejność tych odwróceń jest ilustracją wprowadzonej w rozdz. 2.8.5 klasyfikacji bocznic przekątnych oraz ilustracją niektórych wniosków rozdz. 2.8.5.

Przedstawiony w niniejszym rozdziale wniosek o jednoznaczności znaków wrażliwości ε_{ir} w sieci płaskiej dla bocznic związanych z węzłami w_{pr}, w_{kr} bocznicy r-tej oraz dla bocznic należących do dwu cykli-komórek, w których



Rys. 3.10.2. Zależności $\dot{V}_i(R_9)$ w sieci z rys. 3.10.1. na podstawie obliczeń symulacyjnych rozpływu powietrza

Fig. 3.10.2. The relation $\dot{V}_i(R_9)$ in the network presented in Fig. 3.10.1. as based on simulated calculations of the distibution of air

występuje r-ta bocznica, nie rozstrzyga o znakach wrażliwości innych bocznic. Analizując jednak wyniki obliczeń podane w tabeli 3.10.1 oraz na rys. 3.10.2 warto zwrócić uwagę na dodatnie znaki wrażliwości ε_{39}, ε_{59}. Bocznice te w sieci podstawowej (rys. 3.10.1a) w początkowym stanie pracy sieci należą do dróg, do których także należy bocznica r-ta, czyli

Tabela 3.10.1

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys. 3.10.1a i wrażliwości wydatków na przyrost oporu w bocznicy 9; przykład "a"

Parametry bocznic w aktualnym stanie pracy sieci							Opór w sieci S^*	Wrażliwość
b_i	w_p	w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{i9}
1	7	1	0.0	122.58	0.0	97.3	24.517	-1.02E+02
2	1	2	10.0	59.69	35.6	0.0	1.194	-1.79E+02
3	1	3	10.0	62.89	39.5	0.0	1.258	7.76E+01
4	2	6	10.0	37.87	14.3	0.0	0.757	-4.59E+02
5	2	5	10.0	21.81	4.7	0.0	0.436	2.80E+02
6	3	5	10.0	9.14	0.8	0.0	0.183	-1.04E+03
7	3	7	20.0	53.75	57.7	0.0	2.150	1.12E+03
8	5	6	10.0	30.96	9.5	0.0	0.619	-7.59E+02
9	6	7	10.0	68.83	47.3	0.0	1.377	-1.22E+03

charakterystyka wentylatora: $H = 1600 - 0.1 \cdot \dot{V}^2$

b_i - numer bocznicy,

w_p, w_k - węzły początkowy i końcowy bocznicy,

R_i - opór bocznicy g/m^7,

$\dot{V}_i$ - wydatek powietrza m^3/s,

W_i - spadek naporu Pa,

H - spiętrzenie wentylatora Pa,

R_i^* - opór bocznicy w sieci dołączonej S^*,

ε_{i9} - wrażliwości wydatków powietrza na przyrost oporu boczniy 9.

dziewiąta. Wraz ze wzrostem oporu R_9 od $R_9 = 0$ do $R_9 = \infty$ wydatki $\dot{V}_3$ oraz $\dot{V}_5$ wzrastają (tab. 3.10.1, rys. 3.10.2). Wydatek $\dot{V}_3$ rośnie odpowiednio od 60.6 m^3/s do 68.8 m^3/s, wydatek $\dot{V}_5$ wzrasta od 17.3 m^3/s do 26.33 m^3/s. Obydwie bocznice w sieci dołączonej S^* (rys. 3.10.1b) względem źródła H_9^* (w bocznicy 9) są przekątne, co może powodować niejednoznaczności znaków ε_{39}, ε_{59}. W sieci o strukturze pokazanej na rys. 3.10.1a wymienione wrażliwości rzeczywiście nie są jednoznaczne.

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza oraz wrażliwości ε_{19} przy innych oporach bocznic w tej sieci pokazano w tab. 3.10.2 (przykład "b"). Wrażliwości ε_{19}, które poprzednio uznano za jednoznaczne, w tabelach

Tabela 3.10.2

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys. 3.10.1a i wrażliwości wydatków na przyrost oporu w bocznicy 9; przykład "b"

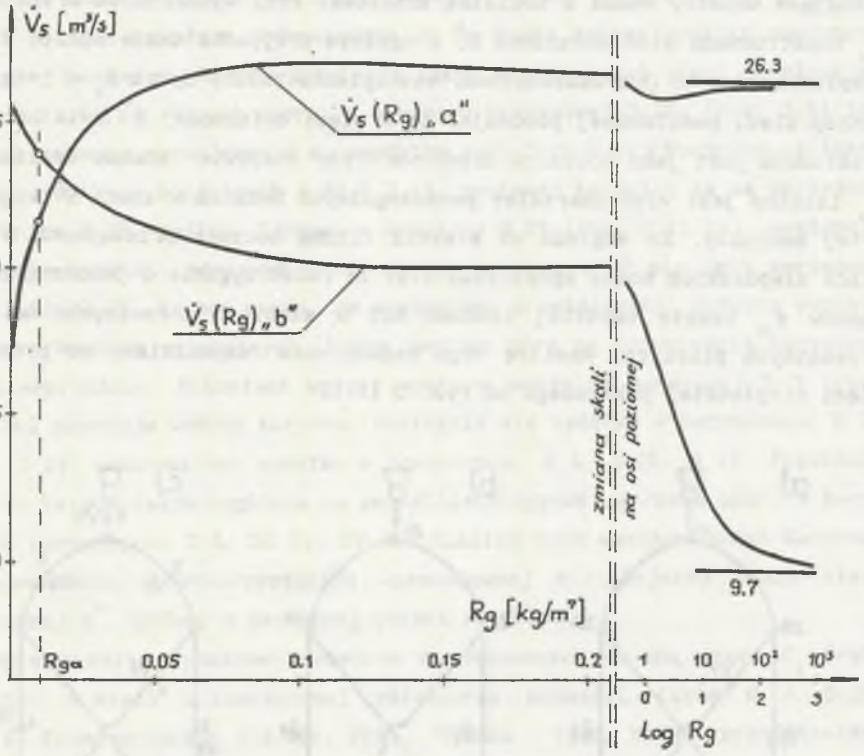
Parametry bocznic w aktualnym stanie pracy sieci							Opór w sieci S^*	Wrażliwość
b_i	w_p	w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{19}
1	7	1	0.0	119.79	0.0	165.0	23.958	-2.51E+02
2	1	2	10.0	73.45	53.9	0.0	1.469	-5.17E+02
3	1	3	10.0	46.33	21.5	0.0	0.927	2.66E+02
4	2	6	10.0	49.57	24.6	0.0	0.991	-3.99E+02
5	2	5	10.0	23.89	5.7	0.0	0.478	-1.18E+02
6	3	5	100.0	19.54	38.2	0.0	3.909	-2.72E+02
7	3	7	200.0	26.79	143.5	0.0	10.716	5.38E+02
8	5	6	10.0	43.43	18.9	0.0	0.869	-3.90E+02
9	6	7	10.0	93.00	86.5	0.0	1.860	-7.90E+02

charakterystyka wentylatora: $H = 1600 - 0.1 \cdot \dot{V}^2$
oznaczenia zastosowanych wielkości tak jak w tab. 3.10.1

3.10.1, 3.10.2 posiadają taki sam znak (co należy traktować jako przykład, a nie jako dowód przedstawionego wniosku). Wrażliwość ε_{39} w tab. 3.10.2 jest nadal dodatnia.

Wydatek powietrza $\dot{V}_3$ w sieci pokazanej na rys. 3.10.1a przy oporach bocznic podanych w tabeli 3.10.2, wraz ze wzrostem oporu R_9 od $R_9 = 0$ do $R_9 = \infty$, wzrasta odpowiednio od $\dot{V}_3 = 42.5$ m^3/s do $\dot{V}_3 = 55.7$ m^3/s. Wyników tych obliczeń nie podajemy w osobnych tabelach. Wrażliwość ε_{59} w tabeli 3.10.2b jest natomiast ujemna, co oznacza, że zależność $\dot{V}_5(R_9)$ przy oporach bocznic (tab. 3.10.2 przykład "b") jest malejąca. Na rys. 3.10.3 pokazano uzyskane z obliczeń wykresy zależności $\dot{V}_5(R_9)$ w tej sieci, tzn.

przykład "a" przy oporach bocznic (tab. 3.10.1) oraz przykład "b" przy oporach bocznic (tab. 3.10.2). Jak widać, zależność $\dot{V}_s(R_g)$ może być malejąca lub rosnąca. W przypadku "a" występuje także słaba niemonotoniczność. Podobne przebiegi rosnący lub malejący można także pokazać dla zależności $\dot{V}_3(R_g)$ przy innych oporach bocznic w sieci z rys. 3.10.1a. Dalsze prawidłowości co do znaków wrażliwości ε_{ir} podane zostaną w następnych rozdziałach pracy.

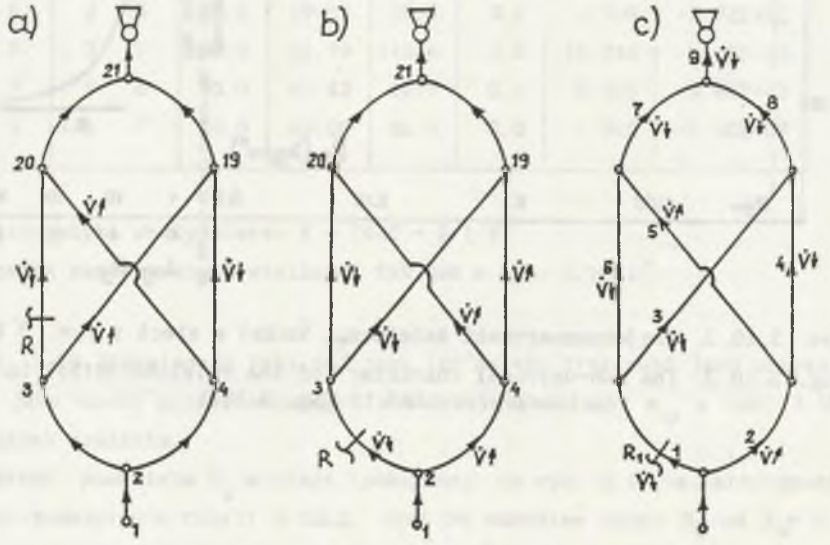


Rys. 3.10.3. Niejednoznaczność zależności $\dot{V}s(R9)$ w sieci z rys. 3.10.1

Fig. 3.10.3. The non-univocal character of the relation $\dot{V}s(R9)$ in the network presented in Fig. 3.10.1

3.11. Przykłady niejednoznaczności znaków wrażliwości w sieciach niepłaskich

W rozdziale 2.8.4 przy badaniu przekątności bocznic podkreślono występowanie dużej liczby bocznic przekątnych w sieciach niepłaskich. W niektórych takich sieciach bocznicami normalnymi są jedynie bocznice posiadające wspólny węzeł z bocznicą źródłową. Przy wyznaczaniu wrażliwości ε_{ir} konstruowana sieć dołączona S^*_r w ogólnym przypadku także będzie siecią niepłaską. Jak to już uzasadniono, wystąpienie zmiany oporu R_r w r-tej bocznicy sieci podstawowej powoduje, że w sieci dołączonej S^*_r r-ta bocznica traktowana jest jako bocznica źródłowa. Przy analizie znaków wrażliwości ε_{ir} istotny jest więc charakter poszczególnych bocznic w sieci S^*_r względem r-tej bocznicy. Ze względu na większą liczbę bocznic przekątnych w sieciach niepłaskich można spodziewać się, że rozstrzyganie o jednoznaczności znaków ε_{ir} będzie bardziej złożone niż w sieciach normalnych, a także przekątnych płaskich. Analizę tego zagadnienia rozpoczniemy od przykładu sieci niepłaskiej pokazanego na rys. 3.11.1..



Rys. 3.11.1. Zmiany wydatków powietrza w sieci niepłaskiej spowodowane wzrostem oporu R wg Karpowa (a,b) oraz wg Bojki (c);
$\dot{V}^{\nearrow}$, $\dot{V}^{\searrow}$ odpowiednio wzrost i zmniejszanie wydatku

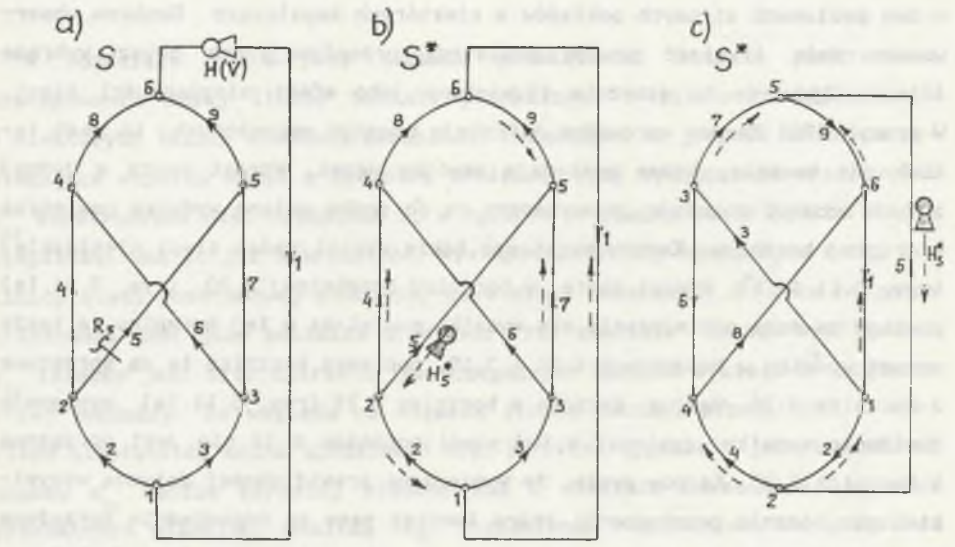
Fig. 3.11.1. Changes in the volume flow of air in a not flat network, due to increased resistance according to Karpow (a,b) and Bojko (c)
$\dot{V}^{\nearrow}$, $\dot{V}^{\searrow}$ increased, decreased volume flow of air

W analizowanych publikacjach dotyczących wzajemnych wpływów zmian parametrów bocznic mało jest informacji o wynikach badań dla sieci niepłaskich. W rozdz. 2.7.1 wspomniano już o niektórych wynikach pracy A.M.Karpowa [70]. W sieciach niepłaskich powstających przy eksploatacji w dwu poziomach stromych pokładów w niektórych kopalniach Donbasu obserwowano małą trwałość prądów powietrza przepływających przez wybrane ściany. Zjawisko to słusznie tłumaczono jako efekt niepłaskości sieci. W pracy [70] Karpow wprowadza definicję bocznic sprzężonych, to jest takich par bocznic, które posiadają wspólny węzeł. Wzrost oporu w jednej z tych bocznic powoduje jednoznaczną co do znaku zmianę wydatku powietrza w drugiej bocznicy. Karpow przytacza także wyniki badań sieci niepłaskiej (rys. 3.11.1a,b). Wzrost oporu w bocznicy przekątnej 3 20 (rys. 3.11.1a) pociąga za sobą zmniejszanie się wydatku powietrza w tej bocznicy, a także wzrost wydatku w bocznicach 4 20 i 3 19, ponieważ bocznice te są sprzężone z bocznicą 3 20. Według Karpowa w bocznicy 4 19 (rys. 3.11.1a) występuje obniżenie wydatku, ponieważ w tej sieci bocznica 4 19 nie jest sprzężona z bocznicą 3 20. Karpow uważa, że wymienione prawidłowości dotyczą wszystkich par bocznic przekątnych, które tworząc parę są odpowiednio sprzężone lub niesprzężone. Natomiast wzrost oporu w bocznicy normalnej 2 3 (rys. 3.11.1b) powoduje według Karpowa obniżanie się wydatku w bocznicach: 2 3, 3 20, 3 19 oraz wzrost wydatku w bocznicach: 2 4, 4 20, 4 19. Prawidłowość tę Karpow także uogólnia na pozostałe przypadki wzrostu oporu w bocznicach normalnych: 2 4, 20 21, 19 21. Analizę tych wyników badań Karpowa, przeprowadzoną z wykorzystaniem wprowadzonej w niniejszej pracy sieci dołączonej S^*, podamy w następnej części rozdziału.

Wykresy zmian wydatków powietrza spowodowanych zmianą oporu R_1 (rys. 3.11.1c) w sieci o identycznej strukturze pokazali także W. A. Bojko i N. F. Kremienczucki [14 str. 228]. Wyniki tych badań przedstawiamy w uproszczonej formie na rys. 3.11.1c, gdzie wzrost lub zmniejszanie się wydatku powietrza w poszczególnych bocznicach, spowodowany wzrostem oporu R_1, zasygnalizowano odpowiednią strzałką w górę lub w dół. Na uwagę zasługuje bardzo słabe obniżanie się wydatku powietrza $\dot{V}_4$ [14 rys. 9.4 str. 228]. Jest to wynik przeciwny do uzyskanego przez Karpowa, który uzasadniał wzrastanie wydatku powietrza w bocznicy 4 19 przy wzroście oporu w bocznicy 2 3 (rys. 3.11.1b).

Na podstawie analizy wrażliwości wykażemy dalej istnienie w tej sieci takich stanów przepływowych, w których wrażliwości ε_{1r} będą posiadały różne znaki, a tym samym niektóre zależności $\dot{V}_1(R_r)$ mogą być rosnące lub malejące.

Analizę rozpoczniemy od przykładu, gdzie wzrost oporu występuje w bocznicy przekątnej piątej (rys. 3.11.2a). Na rys. 3.11.2.b,c pokazano sieć dołączoną S^* w której bocznica piąta ze źródłem $H_5^* = -\dot{V}_5^2$ wymusza przepływy



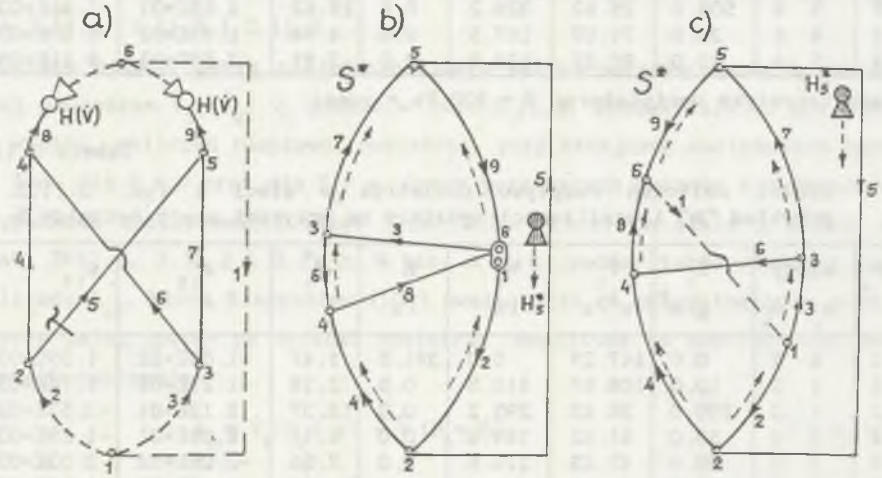
Rys. 3.11.2. Niepłaska sieć podstawowa S (a) i dołączona S* (b,c) przy wyznaczaniu wrażliwości $\mathcal{E}_{15}$

Fig. 3.11.2. Not-flat basic network S (a) and additional network S* (b,c) used to determine the sensitivty $\mathcal{E}_{15}$

ε_{15} w tej sieci. Analiza charakteru poszczególnych bocznic w sieci S^*, przeprowadzona na podstawie rys. 3.11.2c, na którym uwypuklono znaczenie bocznicy źródłowej piątej, wskazuje, że bocznice: 2, 4, 7 oraz 9 w sieci dołaczonej S^* są normalne. Wrażliwości ε_{15} dla tych bocznic posiadają więc jednoznaczne znaki, przy czym ε_{45}, ε_{75} jest dodatnie a ε_{25}, ε_{95} jest ujemne. Można to także bez trudu zauważyć na rys. 3.11.2a,b. Wrażliwość ε_{15}, mimo że bocznica 1 w sieci S^* jest przekątna, posiada jednoznaczny znak i jest ujemna. Wynika to z właściwości sieci podstawowej, gdzie wzrost oporu R_5 powoduje wzrost oporu całkowitego sieci, a tym samym zmniejszenie się wydatku $\dot{V}_1$ (wtedy, gdy charakterystyka wentylatora nie jest pionowa, tzn. przy $\dot{V}_1 \neq$ const). Bocznice 3, 6, 8 w sieci dołączonej S^* względem bocznicy źródłowej piątej są przekątne, co jest łatwo zauważalne na rys. 3.11.2c. Na rys. 3.11.2a tę cechę sieci także można zauważyć; jest to jednak trudniejsze do spostrzeżenia. Nasuwa się więc pytanie: czy przekątny charakter bocznic 3, 6, 8 w sieci S^* rys. 3.11.2c pociąga za sobą niejednoznaczność znaków ε_{35}, ε_{65}, ε_{85}? W tej sieci odpowiedź na to pytanie jest

twierdząca. Wymienione wrażliwości mogą być dodatnie lub ujemne, a tym samym zależności $\dot{V}_i(R_5)$ i = 3, 6, 8, mogą być rosnące lub malejące. Jest to uzależnione od oporów R_i^* bocznic w sieci dołączonej S^*, w tym także od oporu R_1^* bocznicy, w której w sieci podstawowej pracuje wentylator.

Pokażemy najpierw szczególne graniczne przypadki redukcji sieci dołączonej S^* występujące przy poziomej H_1 = const oraz przy pionowej charakterystyce $\dot{V}_1$ = const wentylatora w bocznicy 1. Jak wiadomo, opór R_1^* przyjmuje wtedy szczególne wartości odpowiednio $R_1^* = 0$ oraz $R_1^* = \infty$, a sieć dołączona S^* upraszcza się do postaci pokazanych na rys. 3.11.3b,c.



Rys 3.11.3. Przykład sieci niepłaskiej z dwoma wentylatorami głównymi (a), redukcja sieci dołączonej S^* z rys. 3.11.2 przy $\dot{H}_1$ = const (b), redukcja sieci dołączonej S^* z rys. 3.11.2 przy $\dot{V}_1$ = const (c)

Fig. 3.11.3. Example of a not-flat network with two main fans (a), reduction of the additional network S^* presented in Fig. 3.11.2. at $\dot{H}_1$ = const (b) and at $\dot{V}_1$ = const (c)

Przy $\dot{H}_1$ = const opór $R_1^* = 0$. Pozwala to na zlepienie węzłów krańcowych 6 1 tej bocznicy (rys. 3.11.3b). Sieć dołączona S^* staje się wtedy płaska, a bocznica 6 jest normalna, przy czym ε_{65} jest wtedy zawsze ujemne. Pokrywa się to z wnioskami Karpowa [70] o malejącej zależności $\dot{V}_6(R_5)$. Bocznice 3 oraz 8 są natomiast w dalszym ciągu w sieci S^* przekątne i jak pokażemy dalej ε_{35} oraz ε_{85} może być zarówno dodatnie jak i ujemne.

Przy $\dot{V}_1$ = const opór $R_1^* = \infty$, co upoważnia do odrzucenia tej bocznicy w sieci S^* (rys. 3.11.3c). Sieć ta w tym przypadku także staje się płaska, a bocznica 3 oraz 8 przyjmują charakter bocznic normalnych. Zgodność odpowiednich strzałek wskazuje, że wrażliwość ε_{35} oraz ε_{85} jest wtedy dodatnia, czyli zależności $\dot{V}_3(R_5)$, $\dot{V}_8(R_5)$ będą rosnące. Bocznica 6 w sieci S^* jest dalej przekątna, co wskazuje na niejednoznaczność znaku ε_{65}.

Tabela 3.11.1

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys. 3.11.2 **przykład "a"** i wrażliwości wydatków na przyrost oporu bocznicy 5

b_i	Węzły w_p	Węzły w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{i5}	$\varepsilon_{i5}^{(2)}$
1	6	1	0.0	159.34	0.0	500.0	0.00	-1.63E+02	3.60E+03
2	1	2	70.0	66.70	311.4	0.0	9.34	-1.03E+02	2.41E+03
3	1	3	5.0	92.64	42.9	0.0	0.93	-5.99E+01	1.19E+03
4	2	4	7.0	12.05	1.0	0.0	0.17	2.99E+02	-8.17E+03
5	2	5	20.0	54.65	59.7	0.0	2.19	-4.03E+02	1.05E+04
6	3	4	60.0	67.02	269.5	0.0	8.04	-1.07E+02	2.66E+03
7	3	5	500.0	25.62	328.2	0.0	25.62	4.68E+01	-1.46E+03
8	4	6	30.0	79.07	187.5	0.0	4.74	1.93E+02	-5.50E+03
9	5	6	20.0	80.27	128.8	0.0	3.21	-3.55E+02	9.11E+03

charakterystyka wentylatora: H_1 = 500 Pa = const.

Tabela 3.11.2

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys. 3.11.2 **przykład "b"** i wrażliwości wydatków na przyrost oporu bocznicy 5

b_i	Węzły w_p	Węzły w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{i5}	$\varepsilon_{i5}^{(2)}$
1	6	1	0.0	147.29	0.0	391.5	1.47	-1.05E+02	1.39E+03
2	1	2	10.0	108.87	118.5	0.0	2.18	-1.27E+02	1.74E+03
3	1	3	200.0	38.42	295.2	0.0	15.37	2.12E+01	-3.53E+02
4	2	4	50.0	61.62	189.8	0.0	6.16	8.08E+01	-1.29E+03
5	2	5	80.0	47.25	178.6	0.0	7.56	-2.08E+02	3.03E+03
6	3	4	15.0	29.59	13.1	0.0	0.89	-1.17E+02	1.84E+03
7	3	5	25.0	8.83	1.9	0.0	0.44	1.39E+02	-2.20E+03
8	4	6	10.0	91.20	83.1	0.0	1.82	-3.66E+01	5.53E+02
9	5	6	30.0	56.08	94.3	0.0	3.37	-6.90E+01	8.36E+02

charakterystyka wentylatora: $H_1 = 500 - 0.005 \cdot \dot{V}^2$

Tabela 3.11.3

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w sieci z rys. 3.11.2 **przykład "c"** i wrażliwości wydatków na przyrost oporu bocznicy 5

b_i	Węzły w_p	Węzły w_k	R_i g/m^7	$\dot{V}_i$ m^3/s	W_i Pa	H Pa	R_i^*	ε_{i5}	$\varepsilon_{i5}^{(2)}$
1	6	1	0.0	100.00	0.0	169.1	niesk.	0.0	0.0
2	1	2	20.0	55.29	61.1	0.0	2.21	-1.51E+02	3.09E+03
3	1	3	30.0	44.71	59.9	0.0	2.68	1.51E+02	-3.09E+03
4	2	4	500.0	7.89	31.1	0.0	7.89	1.06E+02	-3.30E+03
5	2	5	20.0	47.40	44.9	0.0	1.89	-2.57E+02	6.40E+03
6	3	4	25.0	35.95	32.3	0.0	1.80	5.42E+01	-1.87E+02
7	3	5	600.0	8.76	46.0	0.0	10.52	9.69E+01	-2.90E+03
8	4	6	40.0	43.84	76.8	0.0	3.51	1.60E+02	-3.49E+03
9	5	6	20.0	56.16	63.0	0.0	2.25	-1.60E+02	3.49E+03

charakterystyka wentylatora: $\dot{V}_1$ = 100 m^3/s = const,

oznaczenia wielkości jak w tabeli 3.10.1

W tabelach 3.11.1,2,3 podano przykłady wyników obliczeń rozpływu powietrza, wrażliwości ε_{is}, $\varepsilon_{is}^{(2)}$, uzyskane przy różnych oporach bocznic w sieci podstawowej (rys. 3.11.1a) oraz przy różnych charakterystykach wentylatora $H_1(\dot{V}_1)$. Dla bocznic: 5, 2, 9 wrażliwości ε_{is} są zawsze ujemne, dla bocznic 4 i 7 wrażliwości ε_{is} są zawsze dodatnie. Wskazane poprzednio bocznice 6, 3 i 8 jako przekątne w sieci dołączonej S, uzyskują wartości ε_{is} dodatnie lub ujemne, co jest uzależnione od oporów bocznic R_i^* w sieci dołączonej S^*, czyli od parametrów bocznic w aktualnym stanie pracy sieci podstawowej S. Rysunki 3.11.4a,b,c ilustrują kierunki przepływów ε_{is}, czyli znaki tych wrażliwości według danych zawartych odpowiednio w tabelach 3.11.1, 3.11.2 i 3.11.3.

Dalsze potwierdzenie niejednoznacznego wpływu wzrostu oporu R_s na wydatki powietrza $\dot{V}_3$, $\dot{V}_6$, $\dot{V}_8$ podano w tab. 3.11.4. Zestawienie to przedstawia wyniki obliczeń rozpływu powietrza przy skrajnych wartościach oporu R_s, tzn. dla $R_s = 0$ oraz dla $R_s = \infty$. Opory pozostałych bocznic w tych trzech przypadkach analizowanych sieci (rys. 3.11.4a,b,c) są stałe i podane są w tab. 3.11.1, 3.11.2 i 3.11.3. W tab. 3.11.4 podano także wartości tzw. amplitudy A_{is}, którą Riazanciew [103] uważa także za przydatną przy ocenie wpływów zmian oporów na wydatki powietrza. Amplituda ta zdefiniowana jest w sposób następujący:

$$A_{ir} = \dot{V}_i(R_r = \infty) - \dot{V}_i(R_r = 0) \qquad (3.11.1)$$

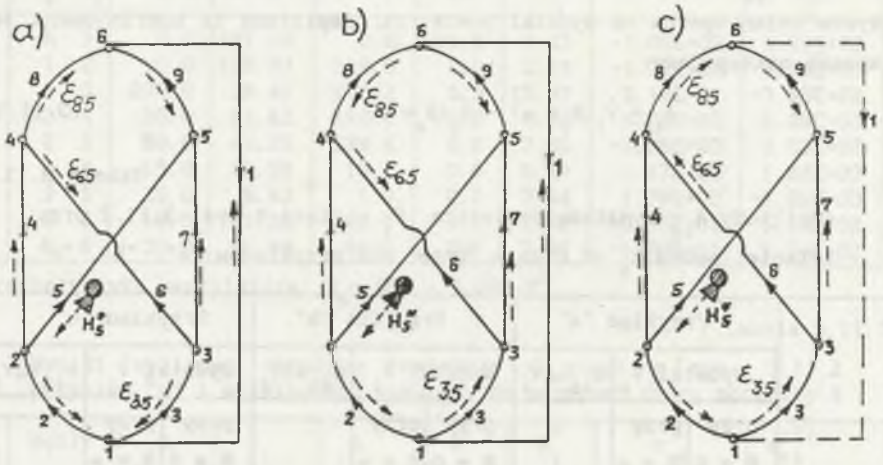
Tabela 3.11.4

Amplitudy A_{is} wydatków powietrza $\dot{V}_i$ w sieci z rys. 3.11.2 przy zmianie oporu R_s od 0 do ∞. Dane dla przykładów "a", "b", "c"

	Przykład "a"			Przykład "b"			Przykład "c"		
	Wydatki $\dot{V}_i$		$A_{is}=\Delta\dot{V}_i$	Wydatki $\dot{V}_i$		$A_{is}=\Delta\dot{V}_i$	Wydatki $\dot{V}_i$		$A_{is}=\Delta\dot{V}_i$
	przy $R_s = 0$	przy $R_s = \infty$		przy $R_s = 0$	przy $R_s = \infty$		przy $R_s = 0$	przy $R_s = \infty$	
b_i w_p w_k	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
1 6 1	163.6	131.3	-32.3	170.5	119.6	-50.9	100.0	100.0	0.0
2 1 2	69.5	49.9	-19.6	138.2	77.3	-60.9	59.2	22.3	-36.9
3 1 3	94.1	81.4	-12.7	32.3	42.3	10.0	40.8	77.7	36.9
4 2 4	3.6	49.9	46.3	37.5	77.3	39.8	4.6	22.2	17.6
5 2 5	65.8	0.0	-65.8	100.7	0.0	-100.7	54.6	0.0	-54.6
6 3 4	69.9	51.4	-18.5	59.1	6.4	-52.7	34.9	55.2	20.3
7 3 5	24.2	29.9	5.7	-26.8	35.8	62.6	5.8	22.6	16.8
8 4 6	73.5	101.3	27.8	96.6	83.7	-12.9	39.6	77.4	37.8
9 5 6	90.1	29.9	-60.2	73.9	35.8	-38.1	60.4	22.6	-37.8

W tab. 3.11.4 pokazano wartości amplitudy A_{15}. Jak widać, amplitudy te w trzech analizowanych sieciach posiadają ten sam znak co odpowiednie wrażliwości ε_{15}. Dla bocznic 5, 2, 9 są zawsze ujemne. Dla bocznic 4 i 7 są zawsze dodatnie. Dla bocznic nie posiadających jednoznacznego znaku wrażliwości ε_{15}, tzn. dla 6, 3 i 8, amplitudy te posiadają różne znaki, co potwierdza niejednoznaczność wpływu wzrostu oporu R_5 na wydatki powietrza $\dot{V}_6$, $\dot{V}_3$, $\dot{V}_8$.

W poprzednim rozdziale przy analizie wrażliwości w sieciach przekątnych płaskich stwierdzono, że w tych sieciach istnieją zawsze dwa cykle-komórki zawierające r-tą bocznicę, w których to cyklach znaki wrażliwości ε_{ir} są jednoznaczne. Podany przykład oraz przeprowadzona analiza wskazują, że wymieniona prawidłowość słuszna dla sieci płaskich może być nieprawdziwa dla sieci niepłaskich. Ilustrują to rys. 3.11.4a,b,c, tab. 3.11.1,2,3 i tab. 3.11.4. Znaki wrażliwości ε_{15} są jednoznaczne jedynie dla bocznic posiadających wspólny węzeł z bocznicą 5 oraz dla bocznicy zamykającej 1. W cyklach nawet najkrótszych czterobocznicowych w tym przykładzie nie jest słuszna prawidłowość obowiązująca w cyklach-komórkach sieci płaskiej.



Rys. 3.11.4. Przykłady niejednoznacznych znaków wrażliwości ε_{35}, ε_{65}, ε_{85} w sieci niepłaskiej

Fig. 3.11.4. Example of non-univocal signs of sensitivity ε_{35}, ε_{65}, ε_{85} in a not-flat network

Sieć dołączona S^* pokazana na rys. 3.11.3b powstała z sieci przedstawionej na rys. 3.11.2a jako szczególny przypadek, gdy charakterystyka wentylatora jest pozioma H_1 = const oraz opór R_1 = 0. Ta sieć dołączona S^* (rys. 3.11.3b) odpowiada także sieci podstawowej S pokazanej na rys.

3.11.3a, w której pracują dwa wentylatory główne w bocznicach 8 i 9 oraz świeże powietrze dopływa do sieci dwoma bocznicami 2 i 3. Bocznica zamykająca 1 jest wtedy bezoporowa, co powoduje, że w sieci dołączonej S^* opór $R_1^* = 0$ (rys. 3.11.3b). Przedstawione prawidłowości wynikające z postaci sieci dołączonej S^* (rys. 3.11.3b) są słuszne także w sieci podstawowej (rys. 3.11.3a) nawet przy nieszczególnych charakterystykach wentylatorów pracujących w bocznicach 8 i 9. Jak widać, wrażliwość ε_{65} jest w takim przypadku zawsze ujemna (rys. 3.11.3b). Znaki wrażliwości ε_{35}, ε_{85} uzależnione są od oporów bocznic R_i^*, a więc tym samym od parametrów bocznic w aktualnym stanie przepływowym w sieci. Przykład ten wskazuje więc także na znaczenie sposobu wymuszania przepływu powietrza przez kopalnię. Prawidłowości w zakresie znaków wrażliwości mogą więc także być uzależnione od liczby wentylatorów głównych oraz od liczby dopływów powietrza świeżego do sieci, ponieważ wpływa to na opór R^* bocznicy zamykającej w sieci dołączonej S^*.

Rozpatrywany dotychczas przykład dotyczył sytuacji, gdzie wzrost oporu występował w bocznicy przekątnej 5 (rys. 3.11.2a). Z uwagi na symetrię struktury w tej sieci identyczną analizę przeprowadzić można dla przypadków, gdy wzrost oporu wystąpi w pozostałych bocznicach przekątnych, tzn. 4, 6 i 7 (rys. 3.11.2a). Uzyska się wtedy identyczne wnioski co do prawidłowości znaków wrażliwości ε_{ir}.

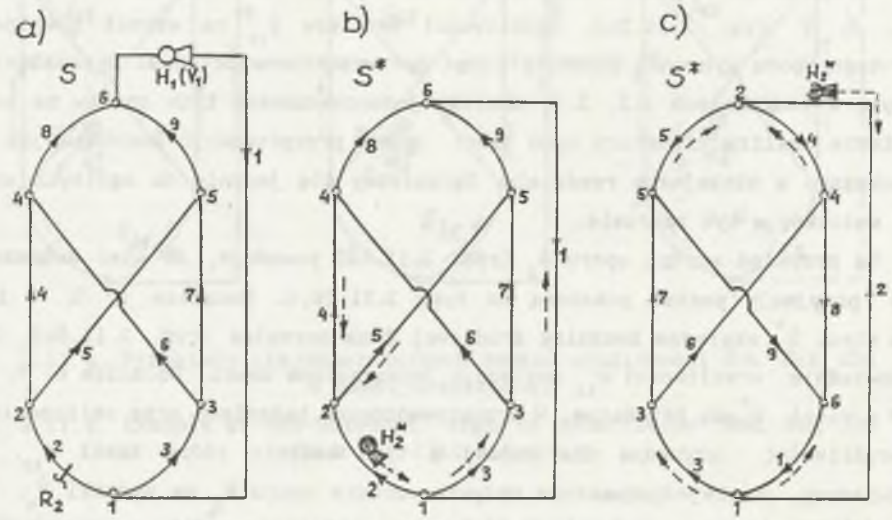
Druga grupa bocznic w analizowanym przykładzie to bocznice normalne: 2, 3, 8, 9 (rys. 3.11.2a). Wrażliwości wydatków ε_{ir} na wzrost dowolnego r-tego oporu wybranej bocznicy mogą być wyznaczone metodami przedstawionymi w rozdziałach 3.2, 3.9. Analizę jednoznaczności tych znaków na podstawie analizy struktury tych sieci można przeprowadzić podobnie jak to pokazano w niniejszym rozdziale. Ograniczmy się jedynie do ogólnych uwag i wniosków w tym zakresie.

Na przykład wzrost oporu R_2 (rys. 3.11.5a) powoduje, że sieć dołączona S^* przyjmuje postać pokazaną na rys. 3.11.5b,c. Bocznice 1, 3, 4 i 5 w sieci S^* względem bocznicy źródłowej 2 są normalne (rys. 3.11.5c). Odpowiednie wrażliwości ε_{12} posiadają jednoznaczne znaki. Bocznice 6, 7, 8, 9 w sieci S^* są przekątne. W przeprowadzonych badaniach oraz obliczeniach wrażliwości uzyskano dla każdej z tych bocznic różne znaki ε_{12}, co świadczy o niejednoznacznym wpływie wzrostu oporu R_2 na wydatki $\dot{V}_6$, $\dot{V}_7$, $\dot{V}_8$, $\dot{V}_9$. Z uwagi na objętość opracowania pomijamy szczegółowe przedstawienie tych wyników. Podobnie jak poprzednio można wyciągnąć wniosek, że znaki wrażliwości są w tym przykładzie jednoznaczne jedynie dla bocznic posiadających wspólny węzeł z bocznicą 2. Nie są słuszne natomiast

prawidłowości, które występują w cyklach-komórkach w sieciach płaskich (rys. 3.11.5b,c). Między innymi wzrost oporu R_2 może spowodować wzrost lub zmniejszenie się wydatku powietrza $\dot{V}_7$ (rys. 3.11.5), co tłumaczy pozorną sprzeczność wyników podanych w pracach Karpowa [70] (rys. 3.11.1b) i Bojki [14] (rys. 3.11.1c).

Podana w niniejszym rozdziale analiza znaków wrażliwości ε_{1r}, przeprowadzona dla jednego przykładu sieci niepłaskiej, nie upoważnia oczywiście do wyciągnięcia wniosków ogólnych co do prawidłowości tych znaków we wszystkich sieciach niepłaskich. Wskazuje jednak, że zagadnienie to jest bardziej skomplikowane niż w sieciach płaskich. Można przypuszczać, że istotna w tym zakresie będzie niesprecyzowana dotychczas bliżej charakterystyka niepłaskości kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zagadnienie to, mające duże znaczenie praktyczne i teoretyczne, powinno być przedmiotem dalszych badań.

W trakcie analizy tego zagadnienia miedzy innymi stwierdzono, że w sieciach niepłaskich, które można odwzorować na sferze, słuszne są prawidłowości dotyczące jednoznaczności znaków wrażliwości w cyklach-komórkach przy założeniu, że w bocznicy zamykającej tych sieci pracuje idealne źródło ruchu powietrza o charakterystyce $\dot{V}$ = const. Konstruowane sieci dołączone S^* stają się wtedy płaskie, co upoważnia do korzystania w takiej sytuacji z wniosków słusznych w sieciach płaskich.



Rys. 3.11.5. Sieć podstawowa S (a) i dołączona S* (b,c) przy wyznaczaniu wrażliwości $\mathcal{E}_{12}$

Fig. 3.11.5. Basic network and additional network S* (b,c) used to determine the sensitivity $\mathcal{E}_{12}$

3.12. Warunki jednoznaczności znaków wrażliwości dla par bocznic

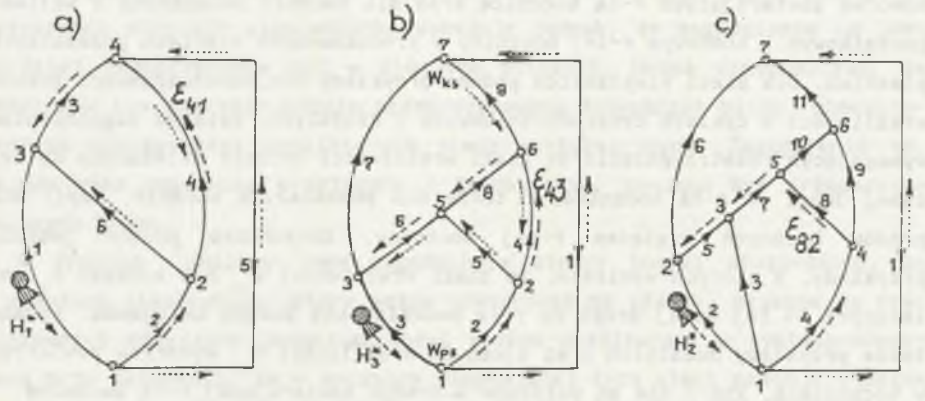
Przeprowadzona w poprzednich rozdziałach analiza znaków wrażliwości ε_{ir}, wykorzystujaca właściwości struktury sieci, pozwoliła na stwierdzenie jednoznaczności tych znaków dla wszystkich bocznic należących do dwu cykli komórek zawierających r-tą bocznicę oraz dla bocznic związanych z węzłami początkowym i końcowym r-tej bocznicy w zredukowanych sieciach przekątnych płaskich. Dla sieci niepłaskich podano przykłady niejednoznaczności znaków wrażliwości w cyklach czterobocznicowych i dłuższych. Dalszym zagadnieniem wymagającym rozstrzygnięcia są znaki wrażliwości bocznic należących do tej samej drogi co r-ta bocznica, a także dla pozostałych bocznic, czyli dla prądów bocznych względem r-tej bocznicy. Dotychczas podano jedynie przykłady, z których wynikało, że znaki wrażliwości ε_{ir} dla bocznic b_i należących do tej samej drogi co r-ta bocznica nie zawsze są ujemne. Podano także przykłady dodatnich oraz ujemnych wrażliwości ε_{ir} wydatków powietrza w bocznicach, które nie są położone w drodze zawierającej r-tą bocznicę.

W następnych rozdziałach zmierzać będziemy do sprecyzowania warunków co do jednoznaczności znaków wrażliwości wynikających ze struktury sieci oraz ze znanych kierunków przepływu powietrza dla tych wymienionych grup bocznic. Dodać jednak trzeba, że zagadnienie to, o czym już wspomniano w rozdz. 3.10, posiada podobny charakter do zagadnienia rozstrzygania o normalności lub przekątności bocznic w sieci podstawowej, gdzie analiza struktury sieci i charakteru poszczególnych bocznic przynosi informację o dużej liczbie bocznic przekątnych (w których kierunek przepływu powietrza nie jest jednoznaczny). Podobnych prawidłowości można się także spodziewać wykorzystując badanie struktury sieci do analizy jednoznaczności kierunków przepływu w sieci dołączonej S^*, czyli przy analizie znaków wrażliwości ε_{ir}.

3.12.1. Analiza znaków wrażliwości dla par bocznic nie leżących w drodze

Analizę znaków wrażliwości ε_{ir} dla bocznic nie należących do tej samej drogi co r-ta bocznica (czyli dla bocznic, które zaliczać będziemy do prądów bocznych względem bocznicy r-tej), rozpoczniemy od nawiązania do analizy przeprowadzonej w rozdz. 3.7 dla najprostszego przykładu sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.1a). W sieci tej przy aktualnych kierunkach przepływu nie istnieje droga, do której należą bocznice 1 i 4. Warto jed-

nak zwrócić uwagę, że istnieje cykl zewnętrzny 1 3 -2 4 1 (według numerów węzłów), do którego należą ze nakiem dodatnim obydwie wymienione bocznice oraz bocznica zamykająca. Istnieje także przekrój całkowity przez tę sieć 1, 6, 4 (wg numerów bocznic rys. 3.12.1a), w którym bocznice 1 i 4 występują z dodatnim znakiem. Zgodnie z analizą przedstawioną w rozdz. 2.9.2, bocznice te nie tworzą pary quasi-równoległej, ani też quasi-szeregowej.



Rys. 3.12.1. Niejednoznaczność znaków wrażliwości wydatków powietrza w prądach bocznych $\mathcal{E}_{41}$ (a), $\mathcal{E}_{43}$ (b) dla par bocznic niezaliczonych jako quasi-równoległe. Przykład quasi-równoległej pary bocznic 8 2 z jednoznacznym dodatnim znakiem wrażliwości $\mathcal{E}_{82}$ (c)

Fig. 3.12.1. The non-univocal character of the signs of sensitivity of the volume flow of air in lateral currents $\mathcal{E}_{41}$ (a), $\mathcal{E}_{43}$ (b) for pair of branches not classified as quasi-parallel ones. Example of a quasi-parallel pair of branches 8 2 with a univocal positiv sign of seisitivity $\mathcal{E}_{82}$ (c)

W rozdziale 3.7 przy analizie znaków wrażliwości w sieci przekątrej prostej stwierdzono, że gdy wzrost oporu występuje w bocznicy 1, to w odpowiedniej sieci dołączonej S^* bocznica 4 jest przekątna względem źródła H_1^* pracującego w bocznicy 1 (rys. 3.7.1.c). Pokazano także, że wrażliwość ε_{41} może być dodatnia, ujemna, a w szczególnym przypadku także równa zero (warunki 3.7.1,2,3). Ta niejednoznaczność ε_{41} wynika z istnienia dwu cykli przechodzących przez bocznicę 1 (która w sieci dołączonej S^* jest bocznicą źródłową, rys. 3.12.1a), skierowanych zgodnie z kierunkiem przepływu wymuszanego przez źródło H_1^*. W cyklach tych bocznica 4 występuje z różnymi znakami, a mianowicie:

- z cylku wewnętrznego 1 2 4 -3 -1 (według numerów węzłów). W cylku tym bocznica 4 o węzłach krańcowych 2 4 występuje ze znakiem dodatnim. Źródło H_1^* w tym cyklu wewnętrznym posiada możliwośćc wymuszania przepływu $\varepsilon_{41} > 0$ (na rys. 3.12.1a strzałki kreskowane),

- z cyklu zewnętrznego 1 -4 -2 3 -1 (według numerów węzłów). W cyklu tym bocznica 4 (węzły 2 4) występuje ze znakiem ujemnym. Źródło H_1^* w tym cyklu zewnętrznym posiada możliwość wymuszania przepływu $\varepsilon_{41} < 0$ (na rys. 3.12.1a strzałki kropkowane).

Istnienie tych dwu cykli, wewnętrznego i zewnętrznego, sprawia więc, że znak wrażliwości ε_{41} nie jest jednoznaczny. W konkretnej sieci przy znanych oporach bocznic, charakterystyce wentylatora oraz przy znanym rozpływie powietrza znak ten może być oczywiście wyznaczony z warunków (3.7.1), (3.7.2) i (3.7.3) lub z obliczeń wrażliwości metodami przedstawionymi w rozdz. 3.2.

Wnioski wynikające z analizy sieci przekątnej prostej (rozdz. 3.7) oraz z wyżej przedstawionych uwag wykorzystamy przy rozstrzyganiu o jednoznaczności znaków wrażliwości dla prądów bocznych względem r-tej bocznicy w innych sieciach. W sieci pokazanej na rys. 3.12.1b wzrost oporu w bocznicy 3 symulowany jest w odpowiedniej sieci dołączonej S^* przez źródło H_3^*, wymuszające przepływy ε_{13}. W sieci podstawowej nie istnieje droga $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$, do której należą bocznice 3 i 4. Bocznicę 4 traktować więc będziemy jako prąd boczny względem dróg przechodzących przez bocznicę 3. W sieci dołączonej S^* bocznica 4 jest jednak przekątna względem źródła H_3^*. Istnieje cykl wewnętrzny 1 2 6 -5 -3 -1 (wg numerów węzłów rys. 3.12.1b strzałki przerywane), w którym bocznica 4 występuje ze znakiem dodatnim, a także cykl zewnętrzny 1 -7 -6 -2 5 -3 -1 (wg numerów węzłów, strzałki kropkowane), w którym bocznica 4 występuje ze znakiem ujemnym. Źródło H_3^* posiada więc możliwość wymuszania w sieci dualnej S^* dodatniego lub ujemnego przepływu ε_{43}, co oznacza, że zależność $\dot{V}_4(R_3)$ nie jest jednoznaczna.

Istnienie dwu wymienionych cykli pociąga za sobą istnienie pewnej analogii w analizowanej sieci do sieci przekątnej prostej. W sieci na rys. 3.12.1b występuje sieć częściowa homeomorficzna z siecią przekątną prostą pokazaną na rys. 3.12.1a. W sieci częściowej relacje między bocznicami 3 i 4 (rys. 3.12.1b) są takie same jak relacje między bocznicami 1 i 4 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.1a). Wymienioną sieć częściową tworzą bocznice, przy których na rys. 3.12.1b naniesiono strzałki kreskowane lub kropkowane, czyli bocznice 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9. Podobieństwo strukturalne sprawia więc, że dla pary bocznic 3 i 4 można spodziewać się podobnych zależności co do pary bocznic 1 i 4 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.1a), czyli niejednoznaczności znaku ε_{43}, a tym samym ε_{34}. Przeprowadzone obliczenia sprawdzające potwierdzają istnienie takich prawidłowości.

Jeżeli więc dla analizowanej pary bocznic b_i, b_j nie istnieje droga, w której bocznice te występują ze znakami dodatnimi (tzn. względem siebie bocznice te położone są w prądach bocznych), istnieje sieć częściowa homeomorficzna z siecią przekątną prostą, relacje między b_i, b_j, w sieci częściowej są takie same jak relacje między bocznicami 1 i 4 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.1a), to znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} nie są jednoznaczne.

W tak sprecyzowanym warunku co do niejednoznaczności znaków ε_{ij}, ε_{ji} kłopotliwe jest rozstrzyganie o istnieniu wymienionej sieci częściowej homeomorficznej z siecią przekątną prostą. Przytoczony warunek można także sformułować w inny sposób. Istnienie wymienionego wcześniej cyklu zewnętrznego, w którym bocznice b_i, b_j, b_z występują ze znakami ujemnymi, stwarza możliwość wystąpienia ujemnych wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} dla bocznic położonych względem siebie w prądach bocznych. Występowanie takiego cyklu jest oczywiście równoważne z istnieniem cyklu zewnętrznego, do którego bocznice b_i, b_j, b_z, należą z dodatnimi znakami, ponieważ są to te same cykle, lecz przeciwnie skierowane. Istnienie zatem cyklu zewnętrznego, w którym b_i, b_j, b_z występują ze znakami dodatnimi, powoduje, że dla analizowanej pary bocznic b_i, b_j, położonych w sieci względem siebie w prądach bocznych, znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} nie są jednoznaczne.

W sieci na rys. 3.12.1b dla pary bocznic 3 i 4 cykl ten według numeracji węzłów jest następujący: 1 3 5 -2 6 7 1. Wrażliwość ε_{43}, a także ε_{34} może być dodatnia lub ujemna, co jest uzależnione od oporów bocznic R_i, charakterystyki wentylatora $H_i(\dot{V}_i)$ a tym samym od wydatków powietrza $\dot{V}_i$ w początkowym stanie pracy sieci. Przy znanych wyżej wymienionych wielkościach wartości wrażliwości mogą być obliczone metodami podanymi w rozdz. 3.2.

Występowanie wymienionego cyklu zewnętrznego, równoważne z niejednoznacznością znaków wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji}, przyjęto w rozdz. 2.9.2 za kryterium niekwalifikowania takiej pary bocznic jako pary bocznic quasurównoległych.

Na rys. 3.12.1c pokazano przykład pary bocznic 2 i 8 położonych w sieci względem siebie w prądach bocznych, dla których nie istnieje cykl zewnętrzny zawierający bocznice 2 i 8 oraz zamykająca z tym samym znakiem (wszystkie ze znakiem ujemnym lub wszystkie ze znakiem dodatnim). Tym samym nie istnieje także sieć częściowa, w której relacje między bocznicami 2 i 8 były by takie same jak relacje między bocznicami 1 i 4 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.1a). Nie istnieje więc możliwość wystąpienia w odpowiedniej sieci dołączonej S^* przepływu ε_{82} ze znakiem ujemnym, co

powoduje, że znak wrażliwości ε_{82} jest zawsze dodatni. Brak cyklu zewnętrznego, w którym bocznice b_i, b_j, b_z występują ze znakiem dodatnim, gwarantuje więc dodatnie znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} dla bocznic b_i, b_j, położnych względem siebie w sieci w prądach bocznych. Taką parę bocznic w rozdz. 2.9.2 przyjęto nazywać parą quasi-równoległą.

3.12.2. Analiza znaków wrażliwości dla par bocznic leżących w drodze

Przy analizie znaków wrażliwości ε_{ir} dla bocznic należących do tej samej drogi co r-ta bocznica ponownie wrócimy do prawidłowości występujących w sieci przekątnej prostej (rysunek 3.12.2a). W sieci tej przy aktualnych kierunkach przepływu istnieje droga, do której należą bocznice 2 i 3, a także istnieje przekrój całkowity przez tę sieć: 3 -6 2 (wg numerów bocznic rysunek 3.12.2a), w którym bocznice 2 i 3 występują z dodatnimi znakami. Zgodnie z analizą przedstawioną w rozdziale 2.9.2 bocznice te nie tworzą pary quasi-szeregowej ani też quasi-równoległej.

W rozdz. 3.7 przy analizie znaków wrażliwości w sieci przekątnej prostej stwierdzono, że gdy wzrost oporu występuje w bocznicy 3, to w odpowiedniej sieci dołączonej S^* (rys. 3.7.4b) bocznica 2 jest przekątna względem źródła H_3^* pracującego w bocznicy 3. Pokazano także, że wrażliwość ε_{23} może być ujemna, dodatnia, a w szczególnym przypadku także równa zero (warunki 3.7.4,5,6). Ta niejednoznaczność ε_{23} wynika z istnienia dwu cykli przechodzących przez bocznicę 3, która w sieci dołączonej S^* jest źródłową (rys. 3.12.2a), skierowanych zgodnie z kierunkiem przepływu wymuszanego przez źródło H_3^*. W cyklach tych bocznica 2 występuje z różnymi znakami, a mianowicie:

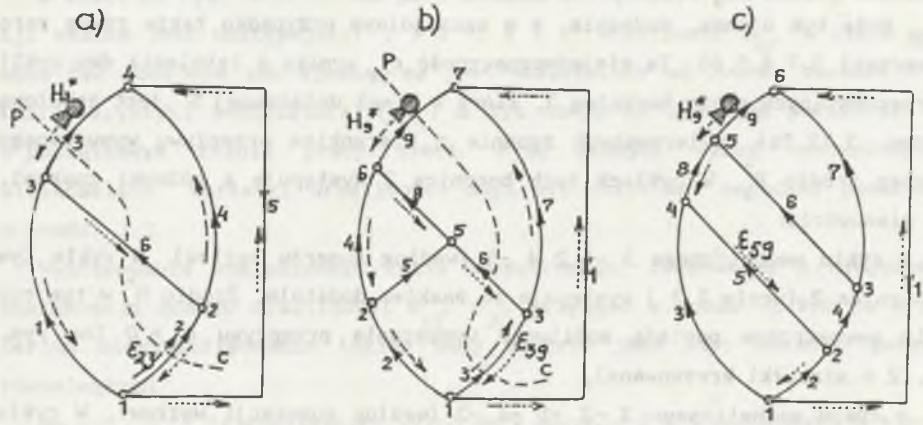
- z cyklu wewnętrznego 3 -1 2 4 -3 (według numerów węzłów). W cyklu tym bocznica 2 (węzły 1 2) występuje ze znakiem dodatnim. Źródło H_3^* w tym cyklu wewnętrznym posiada możliwość wymuszania przepływu $\varepsilon_{23} > 0$ (na rys. 3.12.a strzałki kreskowane),
- z cyklu zewnętrznego 3 -2 -1 -4 -3 (według numeracji węzłów). W cyklu tym bocznica 2 (węzły 1 2) występuje ze znakiem ujemnym. Źródło H_3^* w tym cyklu zewnętrznym posiada możliwość wymuszania przepływu $\varepsilon_{23} < 0$ (na rys. 3.12.2a strzałki kropkowane).

Istnienie tych dwu wymienionych cykli wewnętrznego i zewnętrznego sprawia więc, że znak wrażliwości ε_{23} nie jest jednoznaczny. W konkretnej sieci przy znanych oporach bocznic, charakterystyce wentylatora oraz przy znanym rozpływie powietrza znak ten może być oczywiście wyznaczony z wa-

runków (3.7.4), (3.7.5) i (3.7.6) lub z obliczeń wrażliwości metodami przedstawionymi w rozdziale 3.2.

Podobnie jak rozdziale 3.12.1 wnioski wynikające z analizy sieci przekątnej prostej oraz z wyżej przedstawionych uwag wykorzystamy przy rozstrzyganiu o jednoznaczności znaków wrażliwości ε_{ir} dla bocznic należacych do tej samej drogi co r-ta bocznica. W sieci pokazanej na rysunku 3.12.2b wzrost oporu w bocznicy 9 symulowany jest w odpowiedniej sieci dołączonej S^* przez źródło H^*_9 wymuszające przepływy ε_{19}. W sieci podstawowej istnieje droga $w_{ps} \rightarrow w_{ks}$, do której należą bocznice 9 i 3. W sieci dołączonej S^* bocznica 3 jest jednak przekątna względem źródła H^*_9. Istnieje cykl wewnętrzny 6 -2 -1 3 7 -6 (według numerów węzłów rys. 3.12.2b strzałki przerywane), w którym bocznica 3 (węzły 1 3) występuje ze znakiem dodatnim, a także cykl zewnętrzny 6 -5 -3 -1 -7 -6 (wedlug numerów węzłów - strzałki kropkowane), w którym bocznica 3 (węzły 1 3) występuje ze znakiem ujemnym. Źródło H^*_9 posiada więc możliwość wymuszania w sieci S^* dodatniego lub ujemnego przepływu ε_{39}, co oznacza, że zależność $V_3(R_9)$ nie jest jednoznaczna.

Podobnie jak poprzednio istnieją analogie w analizowanej sieci do sieci przekątnej prostej. W sieci na rys. 3.12.2b występuje sieć częściowa homeomorficzna z siecią przekątną prostą pokazaną na rys. 3.12.2a, w której



Rys. 3.12.2. Niejednoznaczność znaków wrażliwości wydatków powietrza $\mathcal{E}_{23}$ (a), $\mathcal{E}_{39}$ (b) dla bocznic leżących w drodze, lecz nie zaliczonych jako quasi-szeregowe. Przykład quasi-szeregowej pary bocznic 5 9 z jednoznacznym ujemnym znakiem wrażliwości $\mathcal{E}_{59}$ (c)

Fig. 3.12.2. The non-univocal character of the signs of sensivity of the volume flow of air $\mathcal{E}_{23}$ (a), $\mathcal{E}_{39}$ (b) for branches situated along the path but not classified as quasi-serial ones. Example of a quasi-serial pair of branches 5 9 a univocal negativ sign of sensitivity $\mathcal{E}_{59}$ (c)

to sieci częściowej relacje między bocznicami 9 i 3 (rys. 3.12.2b) są takie same jak relacje między bocznicami 3 i 2 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.2a). Wymienioną sieć częściową tworzą bocznice, przy których na rysunku 3.12.2b naniesiono strzałki kreskowane lub kropkowane, czyli bocznice: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9. Dla pary bocznic 9 i 3 można się więc spodziewać podobnych zależności jak dla pary 3 i 2 w sieci przekątnej prostej (rys. 3.12.2a), czyli niejednoznaczności znaku wrażliwości ε_{39} a tym samym ε_{93}. W rozdz. 3.10 podano przykład rosnącej zależności $\dot{V}_3(R_9)$ (tab. 3.10.1 rys. 3.10.2).

Jeżeli więc analizowana para bocznic b_i, b_j leży w drodze, istnieje sieć częściowa homeomorficzna z siecią przekatną prostą i relacje między b_i, b_j w sieci cześciowej są takie same jak relacje między bocznicami 3 i 2 w sieci przekątnej prostej (rys 3.12.2a), to znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} nie są jednoznaczne. Warunek ten można także sformułować w inny sposób. Istnienie wymienionego wcześniej cyklu wewnętrznego, w którym bocznice b_i, b_j występują z różnymi znakami, stwarza możliwość wystąpienia dodatnich wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} dla bocznic leżących w tej samej drodze. Występowanie takiego cyklu jest równoważne z istnieniem przekroju całkowitego P-C (rys. 3.12.2a,b), w którym bocznice b_i, b_j występują z dodatnimi znakami. Istnienie zatem przekroju całkowitego P-C przez sieć, w którym b_i, b_j występują ze znakami dodatnimi, powoduje, że dla analizowanej pary bocznic b_i, b_j leżących w tej samej drodze znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} nie są jednoznaczne.

W sieci na rysunku 3.12.2b dla pary bozcnic 9, 3 przekrój ten jest następujacy 9, -6, 3 (według numerów bocznic - linia przerywana). Wrażliwość ε_{39}, a także ε_{93} może być dodatnia lub ujemna, co jest uzależnione od oporów bocznic R_i, charakterystyki wentylatora $H_1(\dot{V}_1)$ a tym samym od wydatków powietrza $\dot{V}_i$ w początkowym stanie pracy sieci. Posiadanie informacji o tych wielkościach zezwala na przeprowadzenie obliczeń wrażliwości metodami podanymi w rodziale 3.2, a tym samym na uzyskanie informacji co do znaku i wartości wrażliwości ε_{39}.

Istnienie wymienionego przekroju całkowitego przez sieć, w którym bocznice b_i, b_j, należące do tej samej drogi, występują w tym przekroju ze znakami dodatnimi, równoważne z niejednoznacznością znaków wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji}, przyjęto w rozdz. 2.9.2 za kryterium niekwalifikowania takiej pary bocznic jako pary bocznic quasi-szeregowych.

Na rysunku 3.12.2c pokazano przykład pary bocznic 9 i 5 położonych w tej samej drodze, dla których nie istnieje cykl wewnętrzny zawierający te bocznice z różnymi znakami. Tym samym nie istnieje przekrój całkowity

przez sieć, do którego bocznice 9 i 5 należą ze znakami dodatnimi. Powoduje to, że nie istnieje sieć częściowa, w której relacje między bocznicami 9 i 5 są takie same jak relacje między bocznicami 3 i 2 w sieci przekątnej prostej rys. 3.12.2a (przy przyjętym wcześniej założeniu, że w początkowym stanie pracy sieci wydatek powietrza w bocznicy 5 jest dodatni). Nie istnieje więc możliwość wystąpienia w odpowiedniej sieci dołączonej S^* przepływu ε_{59} ze znakiem dodatnim, co powoduje, że znak wrażliwości ε_{59} jest zawsze ujemny. Dla bocznic b_i, b_j leżących w tej samej drodze znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} są więc zawsze ujemne, gdy nie istnieje przekrój całkowity przez sieć, w którym bocznice te występują ze znakami dodatnimi. Taką parę bocznic w rozdz. 2.9.2 przyjęto nazywać parą quasi-szeregową.

3.13. Klasyfikacja par bocznic ze względu na jednoznaczność znaków wrażliwości

Niniejszy rozdział poświęcony będzie klasyfikacji par bocznic. Zasadnicze kryterium przyjęte w proponowanej klasyfikacji to jednoznaczność znaku wrażliwości ε_{ir}, wynikająca z położenia tych dwu bocznic w strukturze sieci (równoległe, quasi-równoległe, szeregowe, quasi-szeregowe, inne). Ponadto wykorzystywać będziemy także istnienie lub brak drogi, do której należą obydwie analizowane bocznice. Zwrócimy także uwagę na możliwość zmiany kierunku przepływu powietrza, gdy i-ta bocznica jest przekątna. Proponowaną klasyfikację wprowadzić można, gdy znane są kierunki przepływu powietrza w początkowym stanie pracy sieci oraz gdy orientacja bocznic zgodna z rzeczywistymi kierunkami przepływu spełnia wymogi acykliczności sieci w sensie dróg. Zakładać także będziemy, że sieć jest zredukowana.

Przeprowadzona w poprzednich rozdziałach analiza jednoznaczności znaków wrażliwośći ε_{ir} pozwala na dokonanie podziału wszystkich par bocznic na dwie grupy :

- pary bocznic, dla których znaki wrażliwości ε_{ij}, ε_{ji} są jednoznaczne,
- pary bocznic, dla których znaki ε_{ij}, ε_{ji} nie są jednoznaczne.

Pary bocznic, dla których znaki wrażliwosci są jednoznaczne, można podzielić na dwie grupy:

- wrażliwość ε_{ij}, a tym samym ε_{ji} jest dodatnia,
- wrażliwość ε_{ij}, a tym samym ε_{ji} jest ujemna.

Dodatnia wrażliwość ε_{ij} występuje zawsze dla pary bocznic tworzących połączenie równoległe (rys. 3.13.1a), a także dla par bocznic zaliczonych do grupy quasi-równoległych (rys. 3.13.1,b,c,d,e,f,g). W rozdz. 2.9.2 do

quasi-równoległych postanowiono zaliczać te pary bocznic b_i, b_j, dla których nie istnieje cykl zewnętrzny zawierający obydwie bocznice z tym samym znakiem. Można tu wyróżnić następujące przypadki pokazane na rys. 3.13.1,b,c,d,e,f,g:

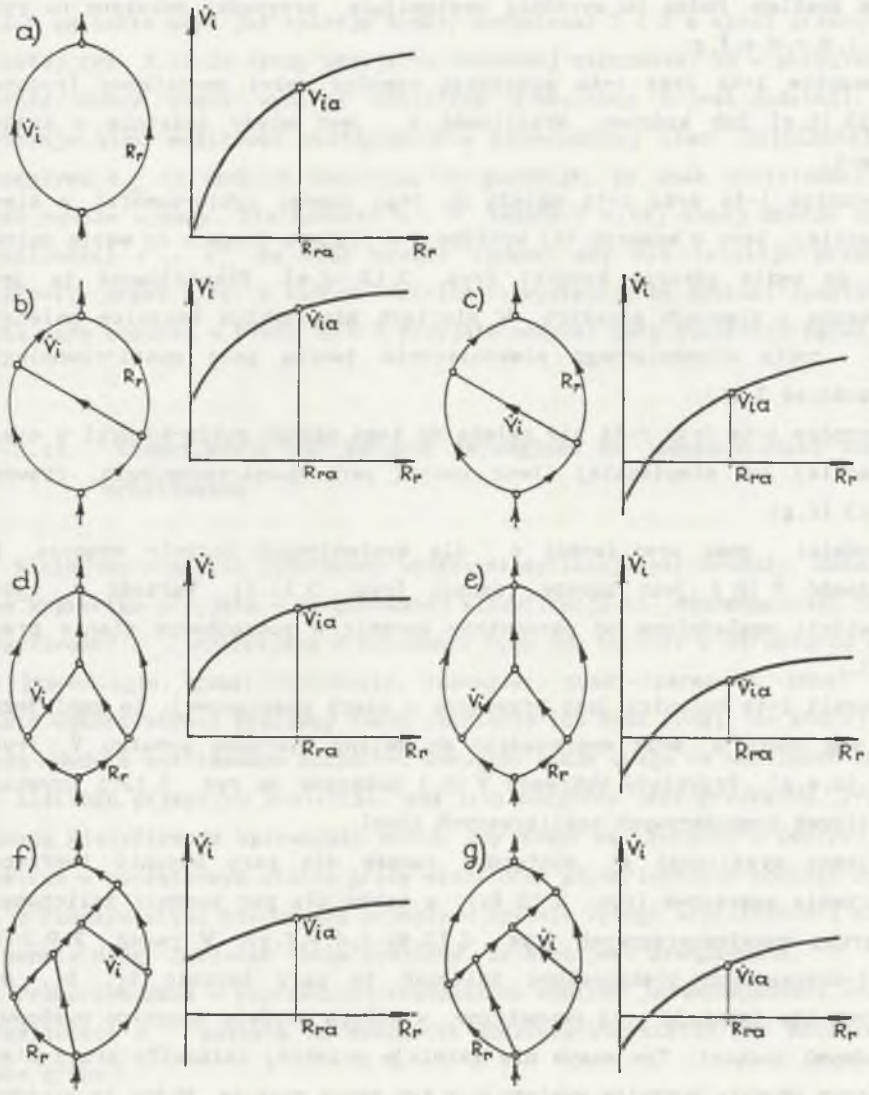
- bocznice i-ta oraz r-ta posiadają wspólny węzeł początkowy (rysunek 3.13.1b,c) lub końcowy. Wrażliwość ε_{ir} jest wtedy dodatnia w każdej sieci,
- bocznica i-ta oraz r-ta należą do tego samego cyklu-komórki w sieci płaskiej, lecz w komórce tej występują w różnych drogach od węzła dolnego do węzła górnego komórki (rys. 3.13.1d,e). Prawidłowość ta jest słuszna w sieciach płaskich. W sieciach niepłaskich bocznice należące do cyklu elementarnego niekoniecznie tworzą parę quasi-równoległą (rozdział 3.11),
- bocznice i-ta oraz r-ta nie należą do tego samego cyklu-komórki w sieci płaskiej lub niepłaskiej (lecz tworzą parę quasi-równoległą, rysunek 3.13.1f,g).

Dodatni znak wrażliwości ε_{ir} dla wymienionych bocznic oznacza, że zależność $\dot{V}_i(R_r)$ jest zawsze rosnąca (rys. 3.11.1). Wartość ε_{ir} jest oczywiście uzależniona od parametrów bocznic w początkowym stanie pracy sieci.

Jeżeli i-ta bocznica jest przekątna w sieci podstawowej, to zmniejszanie się oporu R_r może doprowadzić do zmiany kierunku wydatku $\dot{V}_i$ (rys. 3.13.1c,e,g). Przykłady wykresów $\dot{V}_i(R_r)$ pokazane na rys. 3.13.1 uzyskano z obliczeń komputerowych analizowanych sieci.

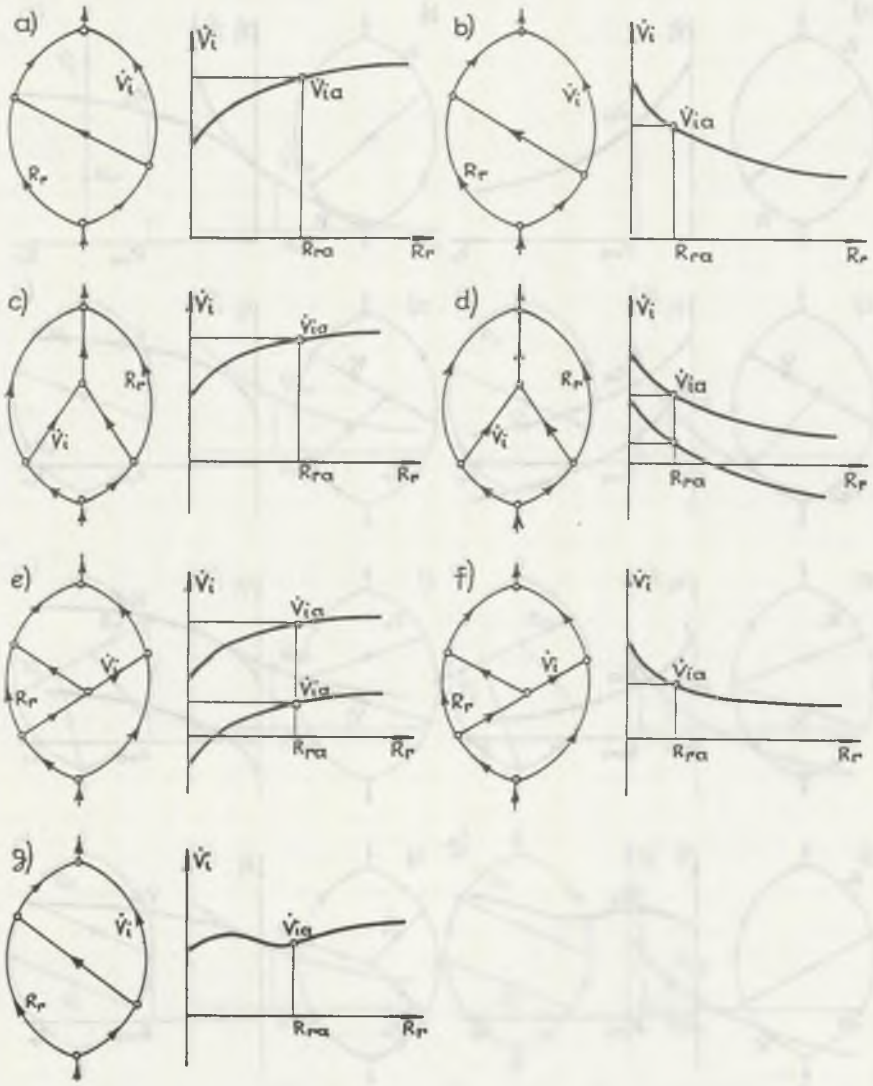
Ujemna wrażliwość ε_{ir} występuje zawsze dla pary bocznic tworzącej połączenie szeregowe (rys. 3.13.4a), a także dla par bocznic zaliczonych do grupy quasi-szeregowych (rys. 3.13.4b,c,d,e,f,g). W rozdz. 2.9.2 do quasi-szeregowych postanowiono zaliczać te pary bocznic b_i, b_j, dla których nie istnieje cykl wewnętrzny, w którym obydwie bocznice występują z różnymi znakami. Tym samym nie istnieje przekrój całkowity przez sieć, w którym obydwie bocznice występują z tym samym znakiem. Można tu wyróżnić następujące przypadki pokazane na rys. 3.13.4b,c,d,e,f,g:

- bocznice i-ta oraz r-ta posiadają wspólny węzeł, lecz węzeł końcowy i-tej jest początkowym r-tej (rys. 3.13.4c) lub węzeł początkowy i-tej jest końcowym r-tej (rys. 3.13.4b). Prawidłowość ta występuje w każdej sieci,
- bocznice i-ta oraz r-ta należą do tego samego cyklu-komórki w sieci płaskiej, a w komórce tej występują w tej samej drodze od węzła dolnego do węzła górnego (rys. 3.13.4d,e). Prawidłowość ta jest słuszna w sie-



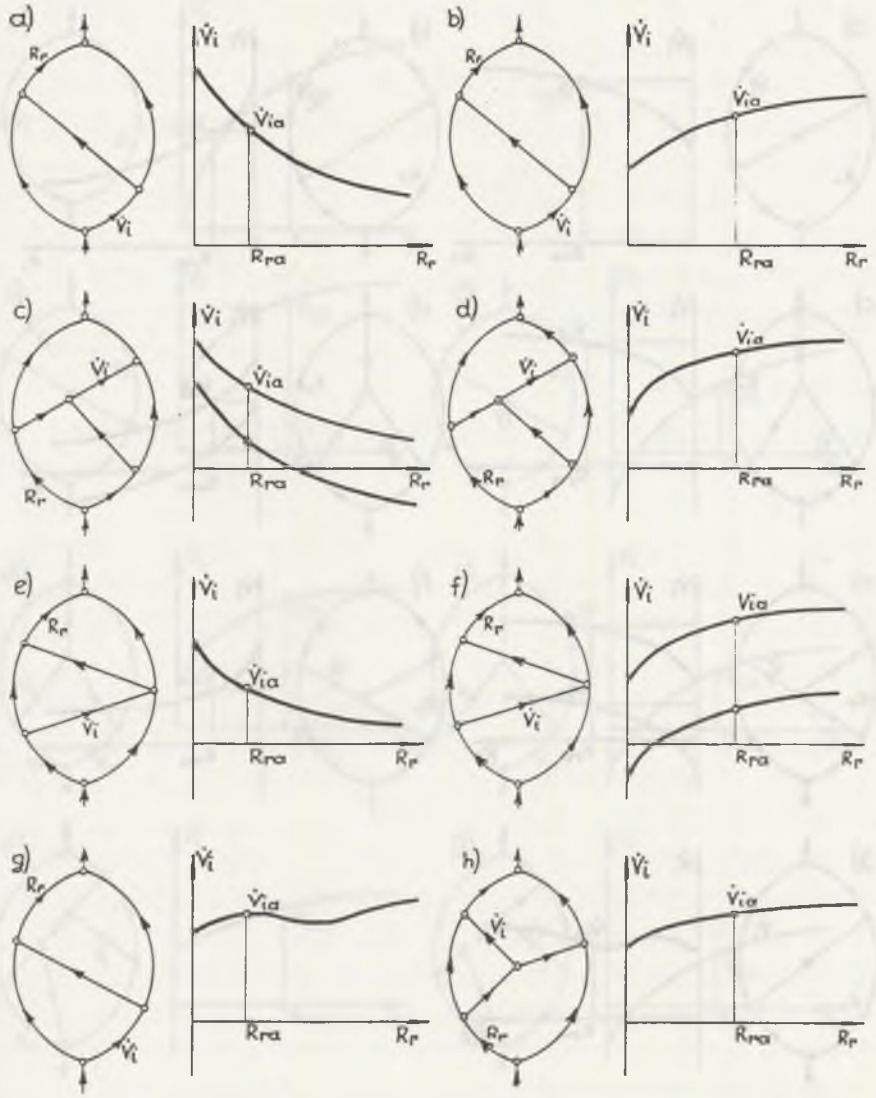
Rys. 3.13.1. Przykłady jednoznacznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dla bocznic równoległych (a) oraz tworzących parę quasi-równoległą (b,...,g)

Fig. 3.13.1. Examples of univocal relations $\dot{V}_i(R_r)$ for parallel branches (a) and branches composing a quasi-parallel pair (b,...,g)



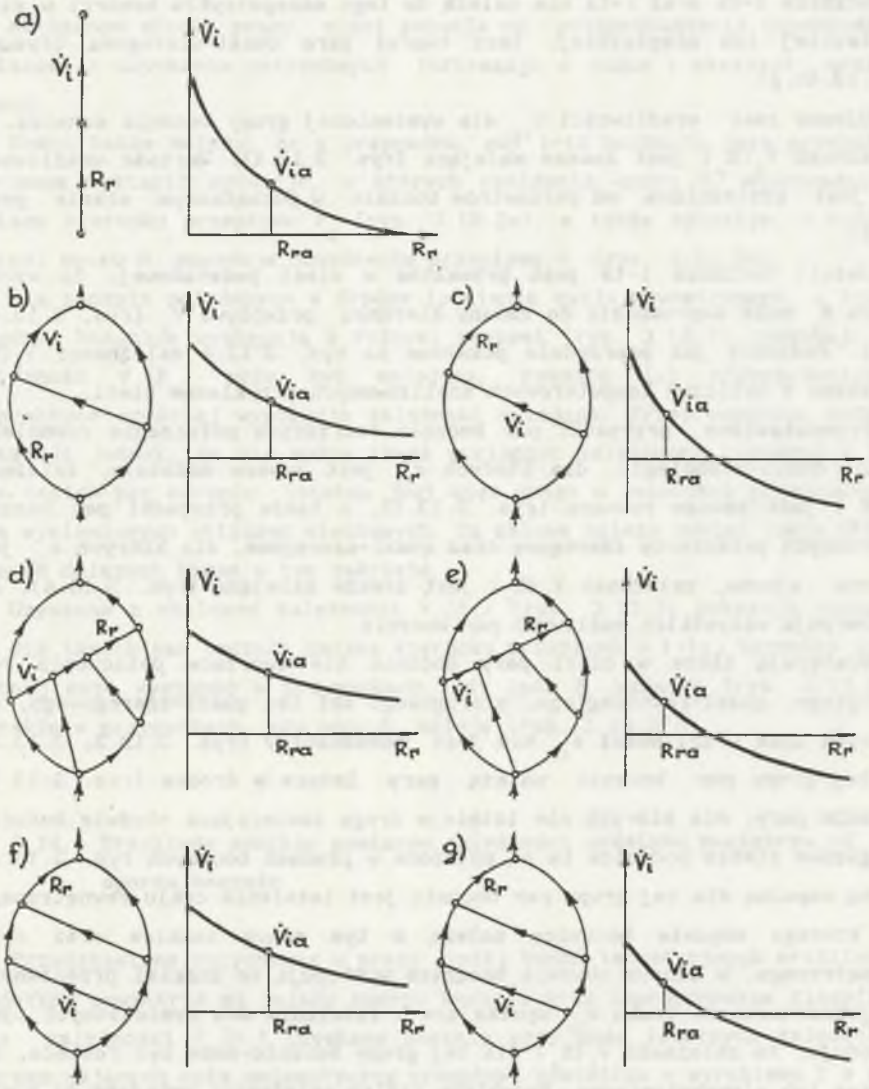
Rys. 3.13.2. Przykłady niejednoznacznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dla bocznic nie leżących w tej samej drodze i nie tworzących pary quasi-równoległej

Fig. 3.13.2. Example of non-univocal relations $\dot{V}_i(R_r)$ for branches not situated along the same path and not composing a quasi-parallel pair



Rys. 3.13.3. Przykłady niejednoznacznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dla bocznic położonych w tej samej drodze, lecz nie tworzących pary quasi-szeregowej

Fig. 3.13.3. Example of non-univocal relations $\dot{V}_i(R_r)$ for branches situated along the same path but not composing a quasi-serial pair



Rys. 3.13.4. Przykłady jednoznaczych zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dla bocznic szeregowych (a) oraz tworzących parę quasi-szeregową (b,...,g)

Fig. 3.13.4. Example of univocal relations $\dot{V}_i(R_r)$ for serial branches (a) and for branches composing a quasi-serial pair (b,...,g)

ciach płaskich. W sieciach niepłaskich bocznice należące do cyklu elementarnego niekoniecznie tworzą parę quasi-szeregową (rozdz. 3.11),

- bocznice i-ta oraz r-ta nie należą do tego samego cyklu komórki w sieci płaskiej lub niepłaskiej, lecz tworzą parę quasi-szeregową (rysunek 3.13.4h,g).

Ujemny znak wrażliwości ε_{ir} dla wymienionej grupy bocznic oznacza, że zależność $\dot{V}_i(R_r)$ jest zawsze malejąca (rys. 3.13.4). Wartość wrażliwości ε_{ir} jest uzależniona od parametrów bocznic w początkowym stanie pracy sieci.

Jeżeli bocznica i-ta jest przekątna w sieci podstawowej, to wzrost oporu R_r może doprowadzić do zmiany kierunku przepływu $\dot{V}_i$ (rys. 3.13.4c, e,g). Podobnie jak poprzednio pokazane na rys. 3.13.4 zależności $\dot{V}_i(R_r)$ uzyskano z obliczeń komputerowych analizowanych przykładów sieci.

Przedstawione przypadki par bocznic tworzących połączenie równoległe oraz quasi-równoległe, dla których ε_{ir} jest zawsze dodatnie, zależność $\dot{V}_i(R_r)$ jest zawsze rosnąca (rys. 3.13.1), a także przypadki par bocznic tworzących połączenie szeregowe oraz quasi-szeregowe, dla których ε_{ir} jest zawsze ujemne, zależność $\dot{V}_i(R_r)$ jest zawsze malejąca (rys. 3.13.4), nie wyczerpują wszystkich możliwych par bocznic.

Występują także w sieci pary bocznic nie tworzące połączenia równoległego, quasi-równoległego, szeregowego ani też quasi-szeregowego, dla których znak wrażliwości ε_{ir} nie jest jednoznaczny (rys. 3.13.2, 3.13.3). Do tej grupy par bocznic należą pary leżące w drodze (rys. 3.13.3), a także pary, dla których nie istnieje droga zawierająca obydwie bocznice (względem siebie bocznice te są położone w prądach bocznych rys. 3.13.2). Cechą wspólną dla tej grupy par bocznic jest istnienie cyklu zewnętrznego, do którego obydwie bocznice należą z tym samym znakiem oraz cyklu wewnętrznego, w którym obydwie bocznice występują ze znakami przeciwnymi. Niejednoznaczność znaku ε_{ir} wynikająca z istnienia dwu wymienionych cykli powoduje, że zależność $\dot{V}_i(R_r)$ dla tej grupy bocznic może być rosnąca, malejąca lub niemonotoniczna. Przykłady takich zależności pokazane na rysunkach 3.13.2, 3.13.3 uzyskano z obliczeń komputerowych analizowanych sieci. W następnym rozdziale podane zostaną przykłady takich niejednoznacznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$, uzyskane z pomiarów w kopalni.

Dla bocznic położonych względem siebie w prądach bocznych ze względu na istnienie cyklu zewnętrznego, w którym obydwie bocznice występują z tym samym znakiem (rys. 3.13.2), zależność $\dot{V}_i(R_r)$ może być rosnąca, malejąca lub niemonotoniczna. Przypuszczać należy, że w praktyce częściej występuje zależność rosnąca. Przeprowadzona analiza a także wyniki obliczeń i pomia-

rów wskazują jednak, że w niektórych przypadkach może także wystąpić malejąca zależność $\dot{V}_i(R_r)$ dla takich par bocznic. Posiadanie informacji o aktualnym stanie pracy sieci pozwala na przeprowadzenie odpowiednich obliczeń i uzyskanie potrzebnych informacji o znaku i wartości wrażliwości.

Dodać także należy, że w przypadku, gdy i-ta bocznica jest przekątna, to mogą wystąpić sytuacje, w których obniżanie oporu R_r doprowadza do zmiany kierunku przepływu $\dot{V}_i$ (rys. 3.13.2e), a także sytuacje, w których wzrost oporu R_r powoduje odwrócenie przepływu $\dot{V}_i$ (rys. 3.13.2d).

Dla bocznic położonych w drodze istnienie cyklu wewnętrznego, w którym obydwie bocznice występują z różnymi znakami (rys. 3.13.3), powoduje, że zależność $\dot{V}_i(R_r)$ może być malejąca, rosnąca lub niemonotoniczna. W praktyce częściej występuje zależność malejąca. Przeprowadzone badania wskazują jednak, że nie można także wykluczyć zależności rosnącej $\dot{V}_i(R_r)$ dla takich par bocznic. Istotna jest więc uwaga o celowości przeprowadzania wymienionych obliczeń sieciowych. Za celowe należy uważać także prowadzenie dalszych badań w tym zakresie.

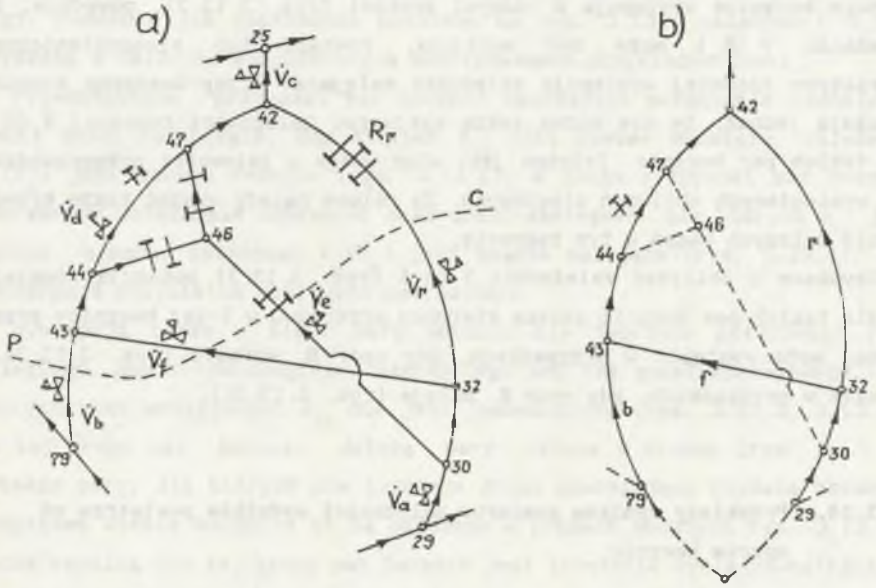
Uzyskane z obliczeń zależności $\dot{V}_i(R_r)$ (rys. 3.13.3) pokazują również, że dla takich par bocznic zmiana kierunku przepływu w i-tej bocznicy przekątnej może wystąpić w przypadkach, gdy opór R_r wzrasta (rys. 3.13.3c), a także w przypadkach, gdy opór R_r maleje (rys. 3.13.3f).

3.14. Przykłady wyników pomiarów zależności wydatków powietrza od oporów bocznic

Przedstawione dotychczas w pracy wyniki badań teoretycznych wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic oraz zaproponowana klasyfikacja zależności $\dot{V}_i(R_r)$ uzyskane zostały przy dość istotnych założeniach upraszczających opis matematyczny przepływu powietrza w wyrobisku i w sieci. Założenia te sprecyzowano w rozdz. 1.3. Podane wyniki obliczeń wrażliwości oraz przykłady zależności wydatku powietrza od zmian oporu $\dot{V}_i(R_r)$ otrzymano metodą symulacji komputerowej rozpływu powietrza w sieci. Oprócz tych wyników badań za celowe uznano przeprowadzenie odpowiednich pomiarów w kopalni. Wyniki pomiarów będą ilustracją przeprowadzonej analizy teoretycznej, a także potwierdzeniem możliwości występowania w praktyce niejednoznacznych zależności $\dot{V}_i(R_r)$. Podamy dwa przykłady takich wyników pomiarów zmian w rozpływie powietrza, spowodowanych zamierzoną w eksperymencie zmianą oporu wybranej bocznicy.

Przykład 1

Na rys. 3.14.1 pokazano schemat kanoniczny fragmentu sieci związanego z oddziałem wydobywczym w kopalni "K", w którym przeprowadzono pomiary. Powietrze świeże do oddziału doprowadzane było z prądów grupowych dwiema drogami, tj. od węzłów 29 i 79. Zużyty prąd powietrza kierowany był do prądów grupowych jednym wylotem z oddziału - bocznica 42 25. Pokazany fragment sieci jest niepłaski, co wynika z wykonania wyrobisk w dwu sąsiednich pokładach. Występuje duża liczba bocznic przekątnych.



Rys. 3.14.1. Schemat kanoniczny fragmentu sieci z oddziałem wydobywczym w kopalni "K" (a). Sieć częściowa w tym fragmencie homeomorficzna z siecią przekątną prostą (b)

Fig. 3.14.1. Canonic diagram of some part of a network in a flat of the colliery "K" (a). A part of the network in this section is homeomorphic with the diagonal straight network (b)

Dla uzyskania zmiany oporu wybranej bocznicy wykorzystano istniejące trzy tamy wentylacyjne w bocznicy 32 42 (rys. 3.14.1). Stopniowe otwieranie lub zamykanie tych tam zezwoliło na uzyskanie 9 stanów przepływowych w oddziale. Każdy taki stan trwał około 20 minut. Eksperyment przeprowadzono na zmianie nieprodukcyjnej. Pomiary prędkości powietrza w każdym stanie pomiarowym wykonywane były z użyciem anemometrów skrzydełkowych

przez sześciu pomiarowców rozmieszczonych w wybranych bocznicach analizowanego fragmentu (rys. 3.14.1). Przy węzłach 32 i 42 mierzono ciśnienie powietrza baroluksami oraz temperaturę psychometrami aspiracyjnymi. Wyznaczony został także przekrój wyrobiska w każdym miejscu pomiaru.

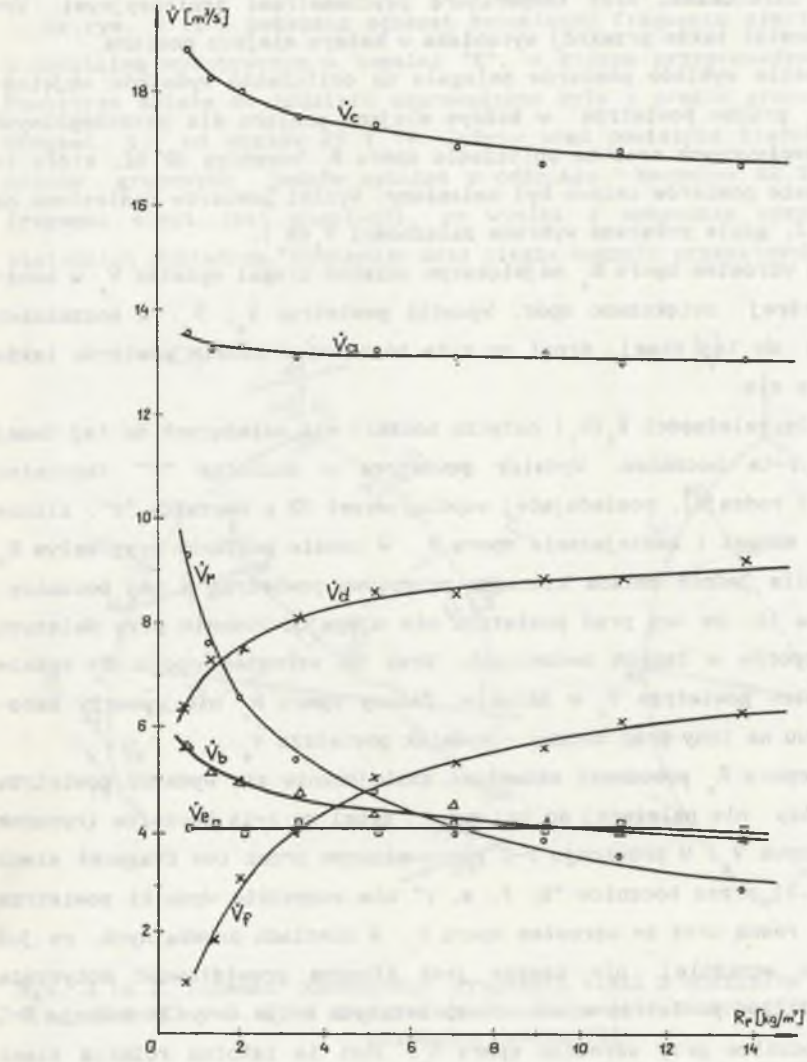
Opracowanie wyników pomiarów polegało na obliczeniu wydatków objętościowych $\dot{V}_i$ prądów powietrza w każdym miejscu pomiaru dla poszczególnych stanów przepływowych oraz na obliczeniu oporu R_r bocznicy 32 42, który to opór w czasie pomiarów celowo był zmieniany. Wyniki pomiarów naniesiono na rys. 3.14.2, gdzie pokazano wybrane zależności $\dot{V}_i(R_r)$.

Wraz ze wzrostem oporu R_r największym zmianom ulegał wydatek $\dot{V}_r$ w bocznicy, w której zwiększano opór. Wydatki powietrza $\dot{V}_a$, $\dot{V}_c$, w bocznicach należących do tej samej drogi co r-ta bocznica w czasie pomiarów także zmniejszały się.

Pozostałe zależności $\dot{V}_i(R_r)$ dotyczą bocznic nie należących do tej samej drogi co r-ta bocznica. Wydatek powietrza w bocznicy "f" (bocznica przekątna I rodzaju), posiadającej wspólny węzeł 32 z bocznicą "r", silnie reaguje na wzrost i zmniejszanie oporu R_r. W czasie pomiarów przy małym R_r nie wystąpiła jednak zmiana kierunku przepływu powietrza w tej bocznicy. Nie oznacza to, że ten prąd powietrza nie ulega odwróceniu przy dalszych zmianach oporów w innych bocznicach. Wraz ze wzrostem oporu R_r rośnie także wydatek powietrza $\dot{V}_d$ w ścianie. Zmiany oporu R_r nie wywarły natomiast wpływu na inny prąd boczny - wydatek powietrza $\dot{V}_e$.

Wzrost oporu R_r powodował natomiast zmniejszanie się wydatku powietrza $\dot{V}_b$ w bocznicy nie należącej do tej samej drogi co r-ta bocznica (rysunek 3.14.2, krzywa $\dot{V}_b$) W przekroju P-C poprowadzonym przez ten fragment sieci (rys. 3.14.1) przez bocznice "b, f, e, r" nie wszystkie wydatki powietrza $\dot{V}_b$, $\dot{V}_f$, $\dot{V}_e$ rosną wraz ze wzrostem oporu R_r. W sieciach przekątnych, co już podkreślano wcześniej, nie zawsze jest słuszna prawidłowość dotycząca wzrostu wydatków powietrza w bocznicach leżących w tym samym przekroju P-C co r-ta bocznica przy wzroście oporu R_r. Jest to istotna różnica sieci przekątnych w porównaniu z sieciami normalnymi, wynikająca ze struktury tych sieci.

Bocznica 79 43 z wydatkiem powietrza $\dot{V}_b$ jest przekątna względem bocznicy r-tej (węzły 32 42). Istnieje cykl zewnętrzny, w którym obydwie bocznice b-ta oraz r-ta występują z dodatnim znakiem. Jest to równoważne z istnieniem odpowiedniego fragmentu sieci homeomorficznego z siecią przekątną prostą (rys. 3.14.1b). Znak wrażliwości ε_{br}, a tym samym charakter zależności $\dot{V}_b(R_r)$ nie jest więc jednoznaczny. Ilustruje to analizę teoretyczną przedstawioną w poprzednich rozdziałach pracy.



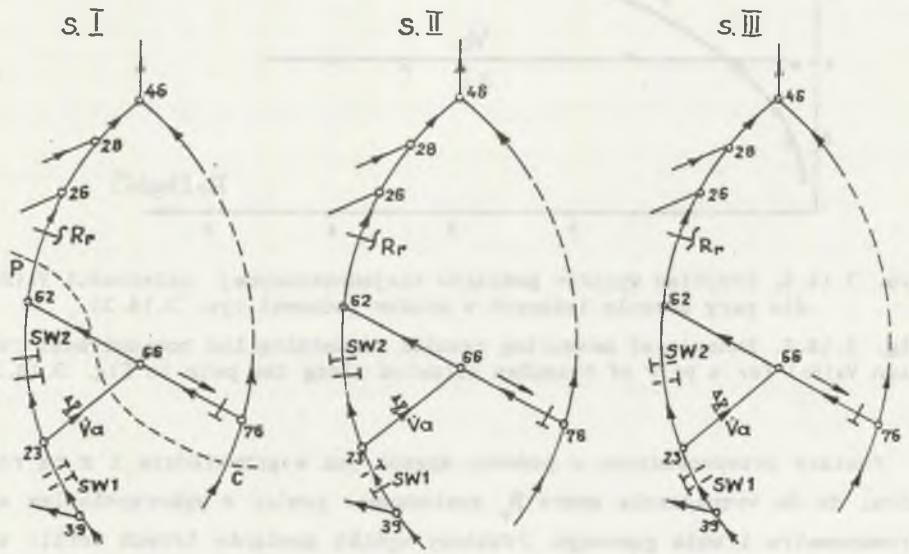
Rys. 3.14.2. Wyniki pomiarów zależności $\dot{V}_i(R_r)$ uzyskane we fragmencie sieci wentylacyjnej pokazanym na schemacie rys. 3.14.1

Fig. 3.14.2. Measuring results of the relation $\dot{V}_i(R_r)$ obtained in the ventilation network section presented in the diagram in Fig. 3.14.1

Przykład 2

W niniejszym przykładzie ograniczymy się do pokazania trzech wykresów zależności $\dot{V}_a(R_r)$ uzyskanych z pomiarów we fragmencie sieci wentylacyjnej kopalni "K" pokazanym na rys. 3.14.3. Fragment ten nie jest związany z częścią produkcyjną kopalni. W stanie normalnym wszystkie tamy wentylacyjne pokazane na rys. 3.14.3 są zamknięte i ograniczają straty powietrza zachodzące między strefą prądów świeżych i zużytych. Fragment ten wybrano do pomiarów celowo ze względu na możliwość zmiany oporów kilku bocznic poprzez otwieranie lub zamykanie pokazanych tam.

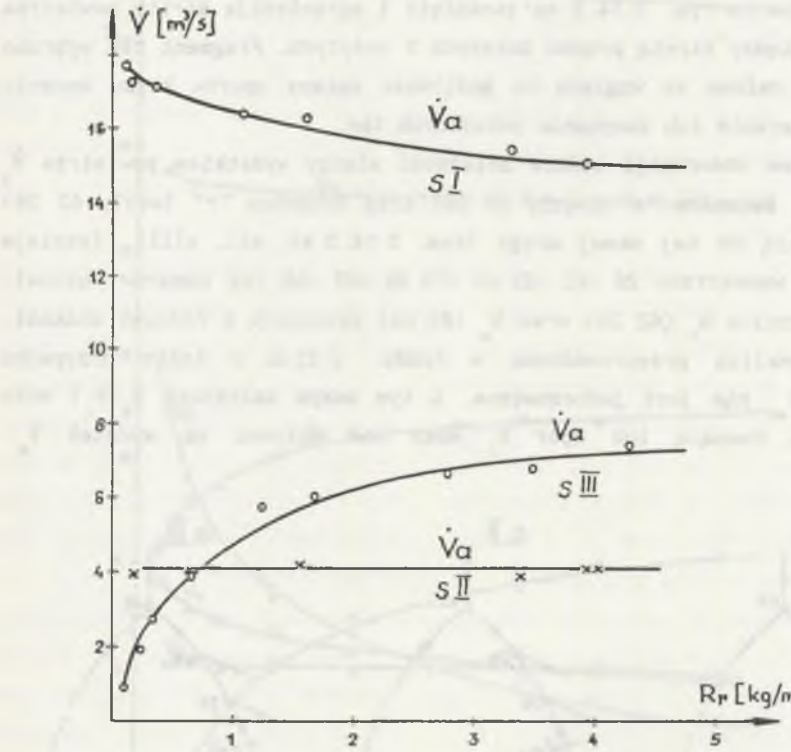
Przedmiotem obserwacji będzie zależność między wydatkiem powietrza $\dot{V}_a$ a oporem R_r. Bocznica "a" (węzły 23 66) oraz bocznica "r" (węzły 62 26) w sieci należą do tej samej drogi (rys. 3.14.3 sI, sII, sIII). Istnieje jednak cykl wewnętrzny 26 -62 -23 66 -76 46 -28 -26 (wg numerów węzłów), w którym bocznice b_r (62 26) oraz b_a (23 66) występują z różnymi znakami. Zgodnie z analizą przeprowadzoną w rozdz. 3.12.2 w takim przypadku wrażliwość ε_{ar} nie jest jednoznaczna, a tym samym zależność $\dot{V}_a(R_r)$ może być malejąca, rosnąca lub opór R_r może nie wpływać na wydatek $\dot{V}_a$.



Rys. 3.14.3. Fragment schematu kanonicznego sieci wentylacyjnej kopalni "K". SI, SII, SIII różne stany otwarcia i zamknięcia tam w śluzach SW1, SW2 w czasie serii pomiarów I, II, III

Fig. 3.14.3. Fragment of the canonic diagram of the ventilation network in the colliery "K". SI, SII, SIII, various stages of opening and closing in the course of measurements I, II, III

Wcześniej pokazano już przykłady takich niejednoznacznych zależności uzyskane z obliczeń komputerowych małych sieci (rozdziały 3.7, 3.10, 3.13). Przedstawione dalej wyniki pomiarów wskazują, że z takim niejednoznacznym wpływem wzrostu oporu R_r na wydatek powietrza $\dot{V}_a$ w bocznicy b_a, leżącej w tej samej drodze co r-ta bocznica, można spotkać się także w rzeczywistych dużych sieciach kopalnianych.



Rys. 3.14.4. Przykład wyników pomiarów niejednoznacznej zależności $\dot{V}_a(R_r)$ dla pary bocznic leżących w drodze (schemat rys. 3.14.3)

Fig. 3.14.4. Example of measuring results concerning the non-univocal relation $\dot{V}_a(R_r)$ for a pair of branches situated along the path in Fig. 3.14.3

Pomiary przeprowadzono w podobny sposób jak w przykładzie 1 z tą różnicą, że do wyznaczania oporu R_r zastosowano pomiar z wykorzystaniem mikromanometru i węża gumowego. Pokażemy wyniki pomiarów trzech serii: sI, sII, sIII, w których zastosowano różne położenia tam otwartych i zamkniętych, przedstawione na rys. 3.14.3 sI, sII, sIII:

- w serii SI otwarta była śluza wentylacyjna SW1, zamknięta śluza SW2 (rys. 3.14.3sI). Zależność $\dot{V}_a(R_r)$ uzyskana z pomiarów jest malejąca (rys. 3.14.4 krzywa sI),

- w serii SII pomiarów w każdej śluzie SW1 i SW2 jedna z tam była otwarta, a druga tama była zamknięta (rys. 3.14.3sII). Wzrost oporu R_r nie powodował wtedy zmiany wydatku $\dot{V}_a$ (rys. 3.14.4 prosta pozioma sII),
- w serii SIII tamy w obydwu śluzach SW1 i SW2 były otwarte. Wzrost oporu R_r wpływał wtedy na wzrost wydatku $\dot{V}_a$ (rys. 3.14.4 krzywa sIII).

Nadmienić także trzeba, że we wszystkich trzech seriach pomiarowych przy odpowiednio dużym oporze R_r występowała zmiana kierunku przepływu powietrza w bocznicy 76 66 (rys. 3.14.3). Natomiast prąd powietrza w bocznicy 66 62 nie ulegał odwróceniu.

Pokazane przykłady wyników pomiarów niejednoznacznego wpływu oporu R_r na wydatek powietrza $\dot{V}_a$ dla bocznic leżących w tej samej drodze ilustrują więc analizę teoretyczną przeprowadzoną w poprzednich rozdziałach pracy. Dodać także trzeba, że w analizowanym przykładzie istnieje przekrój przez sieć P-C, w którym bocznice b_r oraz b_a występują ze znakiem dodatnim (rys. 3.14.3sI). Tym samym istnieje odpowiednia sieć częściowa homeomorficzna z siecią przekątna prostą, co tłumaczy uzyskaną w pomiarach niejednoznaczność wpływu oporu R_r na wydatek powietrza $\dot{V}_a$.

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

4.1. Wnioski

1. Wzorowany na pracach [75,91] algorytm podziału zbioru węzłów na warstwy w sieci acyklicznej wprowadza kalibrację w zbiorze węzłów wzdłuż przyjętej osi pionowej schematu kanonicznego. Ułatwia to rysowanie schematu, a także umożliwia opracowywanie dalszych metod analizy struktury sieci.

2. Przy analizach sieci przydatne jest korzystanie z wprowadzonych przez Barczyka [9] przekrojów przez sieć. Przy analizie gospodarki powietrzem w kopalni oraz w procesie sterowania rozpływem powietrza może być wykorzystywana opracowana w pracy metoda wyznaczania przekroju całkowitego, poprowadzonego przez bocznice-odbiory powietrza w sieci.

3. Opracowane metody i programy wyznaczania dostępności i osiągalności w zbiorze węzłów sieci acyklicznej ułatwiają wyznaczanie stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza w kopalni, a także są wykorzystywane w następnych metodach analizy struktury sieci.

4. Przeprowadzone badania struktury sieci, będące rozszerzeniem wyników uzyskanych w pracach [72,73,74,125], wskazują na celowość wydzielania w sieci podsieci i tworzenia tzw. sieci (podsieci) zredukowanych (w których wszystkie podsieci zastąpione są jedną bocznicą). Dotyczy to metod obliczeniowych sieci, gdzie zakłada się zróżnicowaną szczegółowość odwzorowania a także dalszych metod analizy struktury. Metody te można znacznie uprościć, gdy przedmiotem analizy jest sieć (podsieć) zredukowana. Przedmiotowe wydzielanie podsieci i tworzenie sieci zredukowanej realizować można opracowanym programem komputerowym, w którym uwzględniono także możliwość identyfikacji hierarchicznych ciągów podsieci.

5. W sieciach wentylacyjnych kopalń występuje zazwyczaj tylko kilka fragmentów spełniających wymogi przyjętej definicji podsieci. Dotyczy to głównie fragmentów związanych z oddziałami wydobywczymi. Świadczy to o słabym wyodrębnieniu strukturalnym rejonów wentylacyjnych, co może sprzyjać przenoszeniu się powstających zagrożeń do rejonów sąsiednich.

6. Przy wykrywaniu planarności sieci można posługiwać się opracowaną metodą i programem komputerowym tworzenia zbioru niezależnych cykli-komórek spełniających warunek Mac Lane'a. Cykle te można wykorzystać przy odwikłaniu schematu kanonicznego sieci płaskiej. Sprecyzowane właściwości sieci płaskich i niepłaskich pozwalają na rozstrzyganie o niepłaskości sieci.

7. Przedstawiona metoda badania planarności sieci wentylacyjnych może być uogólniona na dowolne grafy po doprowadzeniu grafu do postaci spełniającej wymagane założenia metody.

8. Za celowe należy uważać uściślenie terminologii związanej z jednoznacznością kierunków przepływu powietrza w sieci. Uwaga ta wynika z pracy w kopalniach kilku wentylatorów głównych, z możliwej pracy wentylatorów pomocniczych, a także z wielu innych czynników, które mogą powodować odwrócenia prądów powietrza.

9. Przedstawiona metoda wyznaczania wszystkich bocznic normalnych oraz wszystkich bocznic przekątnych w dowolnej sieci, wzorowana na metodzie podanej w pracy [25] oraz opracowany program komputerowy rozstrzygający o jednoznaczności kierunków przepływu powietrza mogą być wykorzystane w praktyce przy analizie sieci lub jej fragmentów o liczbie bocznic do około 50. Dla większych sieci bardzo szybko narasta czas pracy obecnie dostępnych komputerów.

10. W acyklicznych zredukowanych sieciach płaskich jedynymi bocznicami normalnymi są bocznice posiadające wspólny węzeł z bocznicą zamykającą zastępczą oraz należące do dwóch dróg zewnętrznych (ograniczających schemat kanoniczny w płaszczyźnie rysunku). Bocznice te w sieci płaskiej są wyznaczane w ostatnim etapie opracowanego programu analizy planarności. Wniosek ten traktować należy jako uszczegółowienie wcześniejszych badań Simode'a [112].

11. Nieplanarność sieci powoduje występowanie w tych sieciach bardzo dużej liczby bocznic przekątnych. Mogą występować przypadki, w których jedynymi bocznicami normalnymi są bocznice posiadające wspólny węzeł z bocznicą zamykającą zastępczą. Do oceny trwałości kierunków i wydatków powietrza należy więc także zastosować metody oceny niezawodności pracy systemów. Zagadnienie to powinno być przedmiotem dalszych badań.

12. Duża liczba bocznic przekątnych w sieci skłania do wprowadzania różnych ich klasyfikacji. Oprócz klasyfikacji znanych przydatny może być w praktyce i w dalszych badaniach zaproponowany w pracy podział tych bocznic na cztery rodzaje, wykorzystujący właściwości struktury sieci oraz aktualne kierunki przepływu. Przeprowadzone badania wskazują, że najbardziej podatne na odwrócenia są prądy powietrza w bocznicach przekątnych I rodzaju. Opracowano prosty sposób wyznaczania tych bocznic.

13. Niejednoznaczność kierunków przepływu powietrza może być analizowana opracowaną metodą zezwalającą na rozpatrywanie o przekątności bocznic przy dowolnym położeniu bocznicy źródłowej. W sieci wyróżnić można bocznice, które względem siebie są normalne oraz bocznice, które względem siebie są przekatne.

14. W acyklicznych sieciach zredukowanych oprócz znanych relacji określonych na zbiorze bocznic mogą być także wyróżnione szczególne pary bocznic, dla których nie istnieje cykl zewnętrzny zawierający te bocznice z tym samym znakiem, a także mogą być wyróżnione szczególne pary bocznic, dla których nie istnieje przekrój całkowity przez sieć zawierający te bocznice z tym samym znakiem. Ze względu na podobieństwo do połączenia odpowiednio równoległego i szeregowego pary takie przyjęto nazywać parami quasi-równoległymi i quasi-szeregowymi.

15. Przedstawiona w artykule [36] metoda wyznaczania wiersza macierzy wrażliwości $\mathbb{E}$ wydatków powietrza na zmiany parametrów bocznic oraz opracowane i oprogramowane w niniejszej pracy metody wyznaczania kolumny macierzy $\mathbb{E}$ wrażliwości pierwszego i drugiego rzędu na zmiany oporów bocznic umożliwiają przeprowadzanie wstępnej analizy wpływu wybranego parametru bocznicy na rozpływ powietrza w sieci. Wrażliwości te mogą być wykorzystane w dalszych analizach i obliczeniach optymalizacji rozpływu i rozkładu ciśnienia powietrza w sieci.

16. Przy analizie prawidłowości co do wrażliwości wydatków powietrza w sieci wygodne jest posługiwanie się siecią dołączoną, w której zmiana oporu występująca w sieci podstawowej modelowana jest przez źródło wymuszające przepływy w sieci dołącznej. Przepływy te utożsamiane są z wrażliwościami w sieci podstawowej. Istotny jest charakter poszczególnych bocznic w sieci dołączonej względem bocznicy źródłowej w tej sieci.

17. Na znaki i wartości wrażliwości wpływają także nachylenia charakterystyk wentylatorów głównych oraz nachylenie charakterystyki zastępczej otoczenia (gdy wrażliwości wyznaczne są w podsieci).

18. Przeprowadzone badania wrażliwości w sieciach normalnych, w których pracują tylko wentylatory główne, potwierdzają znane prawidłowości występujące w tych sieciach. Wzrost oporu w dowolnej bocznicy powoduje obniżanie się wydatków powietrza w bocznicach leżących w tej samej drodze oraz wzrost wydatków w pozostałych bocznicach, nie leżących w tej samej drodze. Prawidłowiści te można także tłumaczyć strukturą sieci dołączonej, która w tym przypadku dalej pozostaje siecią normalną.

19. W acyklicznych zredukowanych płaskich sieciach przekątnych znaki wrażliwości wydatków powietrza na zmianę oporu bocznicy są jednoznaczne dla bocznic posiadających wspólny węzeł z bocznicą, w której powstaje zmiana oporu oraz dla bocznic należących do dwu cykli-komórek, w których występuje bocznica ze zmianą oporu. Wynika to z charakteru tych bocznic w sieci dołączonej (bocznice normalne względem źródłowej).

20. W acyklicznych zredukowanych sieciach niepłaskich wrażliwości wydatków powietrza na zmianę oporu bocznicy są jednoznaczne dla bocznic posiadających wspólny węzeł z bocznicą, w której powstaje zmiana oporu. W cyklach nawet czterobocznicowych znaki wrażliwości mogą nie być jednoznaczne. Wiąże się to z rodzajem niepłaskości sieci i z przekątnym charakterem bocznic w sieci dołączonej względem bocznicy zmieniającej opór.

21. W sieciach acyklicznych zredukowanych bocznice nie leżące w tej samej drodze co bocznica zmieniająca opór (prądy boczne względem bocznicy zmieniającej opór) posiadają jednoznaczny dodatni znak wrażliwości wtedy, gdy z bocznicą zmieniającą opór tworzą parę quasi-równoległą.

22. W sieciach acyklicznych zredukowanych bocznice leżące w tej samej drodze co bocznica zmieniajaca opór posiadają jednoznaczny ujemny znak wrażliwości wtedy, gdy z bocznicą zmieniającą opór tworzą parę quasi-szeregową.

23. W sieciach acyklicznych zredukowanych bocznice nie tworzące pary quasi-równoległej lub quasi-szeregowej z bocznicą zmieniającą opór nie posiadają jednoznacznego znaku wrażliwości. Znak ten uzależniony jest od parametrów bocznic w aktualnym stanie pracy sieci, to jest od oporów, wydatków powietrza oraz od nachylenia charakterystyki wentylatora (lub od nachylenia charakterystyki fikcyjnego wentylatora, który zastępuje otoczenie podsieci). Dla bocznic leżących w tej samej drodze co bocznica zmieniająca opór częściej występują ujemne znaki wrażliwości. Mogą jednak także wystąpić wrażliwości dodatnie. Dla bocznic nie leżących w tej samej drodze co bocznica zmieniająca opór częściej występują dodatnie znaki wrażliwości. Mogą jednak także występować wrażliwości ujemne.

24. Zależność wydatku powietrza od oporu bocznicy jest rosnąca dla pary bocznic quasi-równoległych, malejąca dla pary bocznic quasi-szeregowych. Dla pozostałych par bocznic zależność ta może być rosnąca lub malejąca. Mogą także wystąpić słabe zależności niemonotoniczne.

25. Za celowe należy uważać prowadzenie dalszych badań zmierzających do wyjaśnienia następnych prawidłowości występujących przy powstawaniu zmian parametrów bocznic w sieciach wentylacyjnych kopalń głębinowych. W badaniach tych przydatne mogą być prawidłowości pokazane w niniejszej pracy. Celowe jest także rozszerzenie tych badań uwzględniające osiągnięcia teorii regulacji i niezawodności pracy systemów.

4.2. Uwagi końcowe

Przedmiotem pracy były powiązane ze sobą dwa ważne zagadnienia kopalnianej sieci wentylacyjnej, a mianowicie struktura sieci oraz wrażliwości prądów powietrza na zmiany oporów bocznic. Przedstawione wyniki badań, ujęte także we wnioskach końcowych, wskazują na dalszy istotny wpływ właściwości struktury w zagadnieniach kształtowania rozpływu powietrza w kopalni. Cechy sieci wynikające z występowania bocznic

przekątnych dotyczą nie tylko możliwości zmian kierunków przepływu przy zmianach oporów, lecz także niejednoznacznego wpływu tych zmian oporów na zmiany wydatków powietrza w niektórych bocznicach.

Materiał badawczy pracy zawarty jest w dwu zasadniczych częściach (rozdziały 2 i 3), dotyczących struktury sieci oraz wrażliwości prądów powietrza w różnych strukturach. Przedstawione wyniki wskazują także na celowość odmiennego niż dotychczas traktowania niektórych poruszanych problemów. Nie wyczerpują jednak problematyki analizowanych zagadnień. Uwaga ta dotyczy możliwości opracowania dalszych przydatnych metod badania struktury sieci oraz wykorzystania wprowadzonych wrażliwości.

Potrzeby praktyki górniczej w zakresie zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa pracy, rozwój metod numerycznych, a także dostępność sprzętu komputerowego w kopalniach skłaniają do prowadzenia dalszych prac badawczych nad strukturą sieci. Możliwe jest rozszerzenie przedstawionych wyników, doprowadzające do opracowania metod numerycznych identyfikacji schematu kanonicznego sieci. Dla sieci płaskich interesujące właściwości struktury można uzyskać w wyniku analizy grafów dualnych tych sieci. Dla sieci niepłaskich poza rozstrzyganiem o niepłaskości celowe wydaje się opracowanie dalszych metod i algorytmów umożliwiających identyfikację schematu kanonicznego w przestrzeni trójwymiarowej. Interesujące powinno być także uszczegółowienie problematyki dotyczącej niejednoznaczności kierunków przepływu i klasyfikacji bocznic przekątnych. Dalsze rozszerzenie jest również możliwe w zakresie pozytywnych i negatywnych cech sieci wynikających z istnienia prądów zależnych.

Przeprowadzone badania wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic dotyczyły głównie metod wyznaczania oraz wpływu struktury sieci na znaki wrażliwości. Za ważne uznano w trakcie prowadzenia badań uzyskanie w pierwszej kolejności informacji o warunkach dotyczących właśnie znaków wrażliwości. Prawidłowości te wyjaśnione zostały występowaniem różnych struktur sieci. Dalsze badania nawiązujące do przedstawionych metod i wyników powinny dotyczyć sposobów wykorzystania informacji uzyskiwanych z wyznaczanych wrażliwości. Dotyczy to sposobów oceny aktualnego stanu przepływowego w sieci, reagowania sieci na wprowadzane lub przypadkowe zmiany w oporach bocznic, wykorzystania wrażliwości w dalszych metodach obliczeniowych optymalizacji rozpływu powietrza w kopalni. Możliwe jest także opracowanie prawidłowości co do znaków i wartości wrażliwości wydatków powietrza na zmiany innych parametrów bocznic.

LITERATURA

[1] Abramow F.A., Tjan R.B.: Mietody i algoritmy centralizowannogo kontrola i uprawlenija prowietriwaniem szacht. "Nauka", Kijów 1973

[2] Abramow F.A., Bojko W.A.: Awtomatizacja prowietriwania szacht. "Naukowa Dumka", Kijów 1967

[3] Abramow F.A., Bojko W.A., Tjan R.B.: Issledowanija wzaimoswjaznosti wozdusznych potokow w szachtnoj wentilacionnoj seti s pomoszczju bystrodiejstwujuszczej elektronnoj maszyny. IWUZ Gornyj Żurnał, 1965/2

[4] Adamowicz F.J., Lewickij Ż.T., Iwanow Ż.Ż.: Schemy zamieszczienija realnych wientilatorow i ich wzaimnoje prieobrazowanie. IWUZ Gornyj, Żurnał 1975/8

[5] Aprile G.: Le matrici topologiche nel calcolo eloktronico delle reti di ventilazione mineraria. Ind. Min. 1966 17/10

[6] Aprile G.: La reppresentazione rettangolare per le reti di ventilazione mineraria. Ind. Min. 1969 20/5

[7] Aprile G.: Reppresentazione sinottica per le reti di ventilazione mineraria. Ind. Min. Luglio 1970

[8] Banaś K., Zaremba J., Nowicki K., Kolarczyk M.: Topologia systemu programów numerycznej obróbki wyników pomiarów zdjęcia ilościowego i depresyjnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Konf. "Matematyczne metody i technika komp. w górn." t.1, Wrocław-Szklarska Poręba 1987

[9] Barczyk S.: Odwracanie się głównego prądu powietrza przy pożarach we wznoszącym się prądzie. Teoria wypływów bocznych. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa. T II z.4. PWN, Warszwa 1954

[10] Barczyk S.: Uwagi o artykule "Parametryczny sposób regulacji sieci wentylacyjnej". Przegląd Górniczy 1956/9

[11] Baltaretu F., Matei I.: Topological and potential stability of the ventilation systems specific for the Jiu Vallery Colliers. XX Mięnarodowa Konf. Inst. Bezp. Pracy w Górnictwie. Sheffield 1983

[12] Biernacki K., Kolarczyk M., Kropsz K.: Wpływ recyrkulacji powietrza na warunki klimatyczno-gazowe w polskich kopalniach rud miedzi. Materiały Konf. "Hornicka Pribram ve vede a technice" Przybram 1975

[13] Bojko B.A., Pietreczuk A.A., Chamasuridze W.D.: Wzaimoswiazannost' wentilacjonnych sietej szacht pri otricatielnom regulirowanii wozduchorazpriedielenijem w odnoj iz wietwiej sieti. IWUZ Gornyj Żurnał 1975/9

[14] Bojko W.A., Kremienczuckij N.F.: Osnowy razczieta wentilacji szacht. "Niedra", Moskwa 1978

[15] Bołbat I.E., Lebiediew W.I.: Analiticzieskoje opredielienije osnownych paramietrow priwiediennoj charakteristiki wentilatora. Razrabotka miestorożdienij polieznych iskopajemych nr 39. "Technika", Kijów 1975

[16] Bołbat I.E., Lebiediew W.I.: O zatuchanijach wosmuszczienij wosduchorazpriedielienija w wentilacjonnych sietach szacht. Razrabotka miestorożdienij poleznych iskopajemych nr 46. "Technika", Kijów 1977

[17] Budryk W.: Naukowe zasady prowadzenia akcji przeciwpożarowej w kopalniach. Przegląd Górniczo-Hutniczy 1930/2,3,4

[18] Budryk W.: Wspólna praca kilku wentylatorów w normalnych systemach wentylacyjnych. Przegląd Górniczo-Hutniczy 1935/3

[19] Budryk W.: Odwracanie się prądów powietrznych w czasie pożarów podziemnych i sposoby zapobiegania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa 1954 t.II z. 2

[20] Budryk W.: Pożary i wybuchy w kopalniach cz.I. Pożary podziemne. WGH, Katowice 1956

[21] Budryk W.: Wentylacja kopalń cz. I. Przewietrzanie wyrobisk. WGH, Katowice 1961

[22] Budryk W.: Wybór pism. PWN, Warszawa-Kraków 1976

[23] Bystroń H.: Parametryczny sposób obliczania sieci wentylacyjnej. Przegląd Górniczy 1955/5

[24] Bystroń H.: Parametryczny sposób regulacji sieci wentylacyjnej. Przegląd Górniczy 1955/12

[25] Bystroń H.: Sposób kreślenia kanonicznych schematów przewietrzania. Przegląd Górniczy 1956/3

[26] Bystroń H.: Dodatkowe zabezpieczenie prądów schodzących. Przegląd Górniczy 1957/9

[27] Bystroń H.: Graficzne kryteria kierunków prądów w kopalnianych sieciach przewietrzania. Prace GIG s. A Kom. nr 196 Katowice 1957

[28] Bystroń H.: Graficzne rozwiązywanie systemów przewietrzania. Przegląd Górniczy 1958/5-6

[29] Bystroń H.: Ściśle rozwiązywalne systemy przewietrzania. Przegląd Górniczy 1958/12

[30] Bystroń H.: Podstawy schematu potencjalnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace GIG Kom. nr 471 Katowice 1969

[31] Bystroń H:. Teoria stabilizacji rozpływu powietrza w aktywnych sieciach wentylacyjnych. Prace GIG Kom. nr 562 Katowice 1972

[32] Bystroń H.: Współzależność między stabilizacją kierunków a stabilizacją wydatków prądów powietrznych w kopalniach. Przegląd Górniczy 1974/3

[33] Bystroń H.: Einfluss der Stabilisierungstüren und der Gasseitenzufuhr auf die Aufwärtsbewetterung von Grubenbauen in elementaren Gruben während eines Brandes oder Methanausbruchs. Archiwum Górnictwa t. 29 1984/2

[34] Bystroń H.: Einfluss der Zusatzlüfter auf den Grubenwiderstand bei Bewetterung mit Wettern von konstanter Dichte. Archiwum Górnictwa t. 29 1984/4

[35] Calahan D.A.: Projektowanie układów elektronicznych za pomocą maszyny cyfrowej. WNT, Warszawa 1978

[36] Chojcan J.: Sposób obliczania współczynników wpływu zmian wartości elementów sieci na natężenie przepływu powietrza w bocznicach z wykorzystaniem tzw. "sieci dołączonej". Przegląd Górniczy 1975/1

[37] Chojcan J., Lasek L.: Metody analizy wrażliwościowej układów elektronicznych. Skrypt Pol. Śląskiej nr 1239, Gliwice 1985

[38] Chua L.O., Lin P.M.: Komputerowa analiza układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1981

[39] Cichowska Z.: Topologiczna analiza obwodów elektrycznych liniowych. Skrypt Pol. Śląskiej nr 1578, Gliwice 1990

[40] Coj S., Cchaj S.I., Mastaliewa E.I.: Sintez optimalnych sietiej w sistiemie uprawlienia gornymi priedprijatiami."Nauka", Ałma-Ata 1974

[41] Czeczott H.: Teoria prądów przekątnych. Prace AGH, Kraków 1925

[42] Czeczott H.: Regulacja za pomocą depresji dodatkowej w systemach normalnych prostych. Prace AGH, Kraków 1931

[43] Czeczott H.: Wybór pism. PWN, Warszawa 1957

[44] Dai G.Q.: Method of determining the direction of airflow in diagonal branches in complex network of mine ventilation. XIX Międzynarodowa Konf. Instytutów Bezpieczeństwa Górniczego, Katowice 1981

[45] Deo N.: Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. PWN, Warszawa 1980

[46] Dziurzyński W., Tracz J., Trutwin W.: Simulation of mines fires. IV International Mine Ventilation Congress. Brisbane July 1988

[47] Firganek B., Karolczak Z., Krzystanek Z., Marcinkowski K,. Wasilewski S.: Sterowanie procesem wentylacyjnym kopalni węgla kamiennego. Przegląd Górniczy 1975/7-8

[48] Flüge G.: Druckgefälle zur Beurteilung der Stabilität von Wetterströmen. Glückauf Forschungshefte Juni 1969 H 3

[49] Ford L.R., Fulkerson D.R.: Przepływy w sieciach. PWN, Warszawa 1969

[50] Frycz A.: Wpływ koncentracji wydobycia na warunki przewietrzania kopalń. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej nr 226, s. Górnictwo, z. 34, Gliwice 1968

[51] Frycz A., Sułkowski J.: Kierowanie przewietrzaniem kopalni w oparciu o elektroniczną technikę obliczeniową. Przegląd Górniczy 1973/10

[52] Frycz A., Biernacki K.: Aplication of induction ventilation systems for the improvement of climatic conditions in metal mines. International Mine Ventilation Congress. Johannesburg RPA 1975

[53] Frycz A., Kolarczyk M., Drenda J. Salomon A.: Efekty zastosowania elektronicznej techniki obliczeniowej w kierowaniu i projektowaniu wentylacji w kopalniach LGOM. Materiały IV Krajowego Zjazdu Górnictwa Rud. Olkusz-Bukowno 1976 wyd.SITG

[54] Frycz A., Kozłowski B.: Przewietrzanie kopalń metanowych. "Śląsk". Katowice 1979

[55] Frycz A., Kolarczyk M.: Zastosowanie charakterystyki otoczenia podsieci wentylacyjnej do analizy przewietrzania oddziału. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1979/1

[56] Frycz A., Sułkowski J.: Obliczenia niezawodności funkcjonowania systemu wentylacyjnego oddziałów wydobywczych kopalń. Przegląd Górniczy 1983/11-12

[57] Frycz A., Kolarczyk M.: Classical criteria of airflow direction in simple mine ventilation networks - An environment interpretation Proceedings of the 21st International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Sydney 1985

[58] Frycz A., Sułkowski J., Kolarczyk M.: Sposoby wymuszania i regulacji rozpływu powietrza w głębokich kopalniach rud miedzi. Cuprum 1987/1-2

[59] Frycz A., Kolarczyk M. i inni: Dotychczasowe doświadczenia w zakresie wdrażania obliczeń sieci wentylacyjnych w kopalniach ZGW z wykorzystaniem e.t.o. Przegląd Górniczy 1988/11-12

[60] Frycz A., Kolarczyk M.: Sensitivity of air volume outputs to changes in resistance of side branches in a mine ventilation network. IV International Mine Ventilation Congres. Brisbane 1988

[61] Frycz A., Kolarczyk M., Drenda J.: Wyuzitie elektronickej vypocztowej techniky w problematike spojenej z wetranim bani w Polsku. Materiały Sem. "Vetr. a klim. v hlbinnych baniach" ČSVTS, Koszyce 1989

[62] Frycz A., Kolarczyk M.: The suitability of methods used to determine the sensitivity of the air volume output to changes in the resistance of side-branches in the ventilation control of deep collieries. 23rd International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Washington DC 1989

[63] Frycz A., Sułkowski J., Kolarczyk M.: Opriedielenije wietwiej s nieodnoznacznym naprawlenijem wozducha dla nużd analiza biezopasnosti szachtnoj wentiliacionnoj sistiemy. 24th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Donieck 1991

[64] Geher K.: Teoria tolerancji i wrażliwości układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1976

[65] Gustkiewicz J.: O pewnym modelu kopalnianej sieci wentylacyjnej i jego strukturze. Archiwum Górnictwa 1967/3

[66] Huang Y.P.: The direction discriminants of unstable airflow in complex mine ventilation networks and their applications. Proceedings of the 21st International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Sydney 1985

[67] Ignasiak E.: Teoria grafów i planowanie sieciowe. PWE, Warszawa 1982

[68] Jacques E., Patigny J.: Recherches des branches instables dans un reseau d'aerage. XV Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwa Pracy w Górnictwie. Karlowe Vary 1973

[69] Jura Z., Jawień M.: Wpływ modelu kopalni i struktury udostępnienia na topologię systemu wentylacyjnego. Pr. Kom. Nauk. Techn. PAN Górnictwo 1968 z. 5

[70] Karpow A.M.: Szachtnoje wentilacionnoje sojedinienije s sopriażonnymi diagonałami. IWUZ Gornyj Żurnał 1965/9

[71] Klebanow F.S.: Opriedielienije aerodinamiczeskoj effektiwnosti rekonstrukcji szachtnoj wentilacionnoj sieti. Ugol 1973/10

[72] Kolarczyk M.: Własności i zastosowania charakterystyk podsieci i otoczenia w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Pol. Śl. ITEZ, Gliwice 1980 (niepublikowane)

[73] Kolarczyk M.: Otoczeniowa ilustracja warunku H. Czeczotta odnośnie do kierunku przepływu powietrza w bocznicy przekątnej. Biul. Inf. CSRG Bytom 1986/4

[74] Kolarczyk M.: Definiowanie i wyznaczanie charakterystyk części kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 188, Gliwice 1990

[75] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci. WMT, Warszawa 1978

[76] Kristofidies N.: Teoria grafow. Ałgoritmiczieskij podchod. "Mir", Moskwa 1978

[77] Krupiński B.: Wpływ struktury kopalni na zagrożenie pożarowe w świetle analizy pożaru w kopalni "Makoszowy". Archiwum Górnictwa t.VII z. 3 1962

[78] Kruszyński M., Trutwin W.: Stabilność przepływu powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych. Prace Komisji Górn. PAN Zesz. Prob. Górnictwa t. 10 1972/2

[79] Kukuczka A.: Modyfikacja rozcinki pól eksploatacyjnych dla możliwości stosowania kompleksowej metody likwidacji zagrożenia pożarowego. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1974/4

[80] Kulikowski J.L.: Zarys teorii grafów. PWN, Warszawa 1986

[81] Linhart J.: Beeinflussung der Wetterführung beim Herstellen von Schächten mit Vorborlöchern. Konf. 75 Jahre Prüfstelle für Grubenwetterung. Bochum 1976

[82] Linhart J.: Untersuchungen der Grubenbewetterung hinsichtlich ihrer Stabilität. Glückauf 126(1990) Nr 9/10

[83] Lipski W.: Kombinatoryka dla programistów. WNT, Warszawa 1982

[84] Litwiniszyn J.: Wpływ oporu uszczelnień wentylatora na przewietrzanie kopalń. Przegląd Górniczy 1951/12

[85] Litwiniszyn J.: Measure of correspondence between the elements of a set. Certain application of this measure. Bull. Acad. Sci. Pol. CI IV Vol. XIII No.3 1965

[86] Maciejasz Z., Kruk F.: Pożary podziemne w kopalniach. "Śląsk", Katowice 1979

[87] Mester I.I., Zasuchin I.N.: Awtomatizacja kontrola i riegulirowanija rudnicznogo prowietriwanija."Niedra", Moskwa 1974

[88] Miasnikow A.A., Patruszew I.A.: Osnowy projektirowanija wientilacji ugolnych szacht. "Niedra", Moskwa 1971

[89] Miedwiediew B.I., Pawłowskij W.A.: Rascziet wientilacjonnych sietiej szacht. "Technika", Kijów 1977

[90] Miękus J., Nędza Z., Rosiek F.: Klasyfikacja prądów zależnych powietrza uwzględniająca ich podatność na odwrócenia. Cuprum 1976/2

[91] Miękus J.: Jednoznaczny schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej jako graf uporządkowany. Pr. Nauk. Inst. Górn. Pol. Wrocł. Nr 26 Studia i Materiały nr 13 Wrocław 1978

[92] Müller W.: Das Aufsuchen diagonaler Wetterverbindungen in stark vermaschten Wetternetzen. Kali und Steisalz B. 10 H 4/5 1989/8

[93] Olajossy A., Roszczynialski W., Wacławik J.: Kierunek i natężenie przepływu powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych przy liniowym rozkładzie temperatury w bocznicach. Archiwum Górnictwa 1975/2

[94] Patruszew I.A., Afanasjew W.P.: Issledowanije oprokidywanija wientilacjonnych struj w schiemie prowietriwanija odnoj diejstwujuszcziej ugolnoj szachty. Prowietr. Szacht Donieckogo Basiejna. Donugi, Sbornik naucz. trud. nr 44 "Niedra", Moskwa 1969

[95] Patruszew I.A., Karnauch Ch.W.: Ustojcziwost prowietriwanija ugolnych szacht. "Niedra", Moskwa 1973

[96] Patruszew I.A.: Klassifikacja schiem prowietriwanija wientilacjonnych uczastkow szacht Donbassa razrabatywajuszczich połogije i nakłonnyje płasty. Razrab. Miestorożd. Polezn. Iskop. nr 10 "Technika", Kijów 1967

[97] Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J.: Przewietrzanie kopalń. "Śląsk", Katowice 1979

[98] Pawłowskij W.A., Sułkowski J.: O kriteriach płoskosti wientilacijonnoj sieti. Razrab. Miestoroż. Polezn. Iskop. nr 56 "Technika", Kijów 1980

[99] Pollak R., Thomek J.: Das Zeichnen von Wetternetzplänen mit EDV-Anlagen. Glückauf t. 116 1980/9

[100] Ramey R.L., White E.J.: Zastosowanie macierzy w maszynowej analizie układów elektronicznych. PWN, Warszawa 1974

[101] Rajski Cz.: Teoria obwodów. WNT, Warszawa 1971

[102] Reingold E.M., Nievergelt J., Deo N.: Algorytmy kombinatoryczne. PWN, Warszawa 1985

[103] Riazancew T.K.: Ustojcziwost i uprawlajemost szachtnych wientilacjonnych sietiej. "Nauka" KSSR, Ałma-Ata 1978

[104] Roszczynialski W., Wacławik J.: Wpływ gęstości powietrza na kierunek ruchu i wydatek przepływu w wyrobiskach kopalń. Archiwum Górnictwa, t. 191974/2

[105] Roszczynialski W.: Wpływ losowych i deterministycznych zmian oporu aerodynamicznego wyrobisk górniczych na rozpływ powietrza w sieci wentylacyjnej. Zesz. Nauk. AGH, s. Górnictwo, z. 136, Kraków 1988

[106] Roszczynialski W.: Expected value and variance of airflow rate at ventilator working point. Archiwum Górnictwa t. 33 1988/3

[107] Roszczynialski W.: Airflow rates in mine headings and their variance at random varation of aerodynamic drag on branches of mine ventilation network. Archiwum Górnictwa t. 33 1988/4

[108] Roszczynialski W., Trutwin W., Wacławik J.: Kopalniane pomiary wentylacyjne. "Śląsk", Katowice 1992

[109] Ryncarz T., Wacławik J.: Optymalna struktura sieci wentylacyjnej głębokiej kopalni rudy miedzi w LGOM. Mat. Konf. "Przewietrzanie głębokich kopalń" Wyd. SITG, Lubin 1974

[110] Schmidt W.: Stabilität der Bewetterung und Stabilisierungsmöglichkeiten. XIV Międzynar. Konf. Bezp. Pracy w Górnictwie. Donieck 1971

[111] Simode E.: Généralisation de la notion d'orifice équivalent - Résistance équivalente. Aplication à l'etude de la strukture d'un reseau d'aérage. Ind. miner. Mine 1976/2

[112] Simode E.: Détermination de la nature (stable ou instable) des branches d'un réseau. Industr. Miner. Mine 2-76. Aérage.Document SIM N 3

[113] Student R., Litwin J., Szadurski Z., Kolarczyk M.: Wentylacyjne oddziaływanie na pole pożarowe w pokł. 615 w sąsiedztwie czynnej ściany w kop. "Knurów". Wiadomości Górnicze 1985/4

[114] Strumiński A.: Optymalne rozmieszczenie wentylacyjnych tam dławiących z uwagi na rozkład dysypacji energii w kopalni. Archiwum Górnictwa t.23 1976/4

[115] Strumiński A.: Metoda wyznaczania rozpływu powietrza w pasywnych sieciach wentylacyjnych z narzuconymi warunkami. Zeszyty Probl. Górnictwa 1977 t.15/1

[116] Strumiński A.: Sposoby zwiększenia stabilności prądów powietrznych w sieciach wentylacyjnych. Cuprum 1977/4

[117] Strumiński A.: Metoda kompleksowego wyznaczania oporów bocznic kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace Nauk. Inst. Górn. Pol. Wrocł. nr. 26 St. i mater. nr 13. Wrocław 1978

[118] Strumiński A.: Metody autokorekcyjne wyznaczania rozpływów wymuszonych powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych. Prace GIG seria dod. Katowice 1978

[119] Strumiński A.: Optymalizacja rozpływów powietrza w projektowanych sieciach wentylacyjnych. PAN, Wrocław 1985

[120] Sułkowski J.: Topologiczne kryterium odwikłania schematów kanonicznych sieci wentylacyjnych. Przegląd Górniczy 1970/2

[121] Sułkowski J. Rozwiązalność podstawowych zagadnień teorii kopalnianej sieci wentylacyjnej w zależności od jej struktury. Pol.Śl. ITEZ Gliwice 1971 (niepublikowane)

[122] Sułkowski J.: Mesure de la complexité de structure du résau d'aérage minier. Archiwum Górnictwa t. 18 1973/1

[123] Sułkowski J.: Określenie stanu zaburzeniowego w przewietrzaniu oddziału eksploatacyjnego kopalni wywołanego uszkodzeniem tam wentylacyjnych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 70, Gliwice 1976

[124] Sułkowski J.: Wykorzystanie zasady dualizmu w algorytmie obliczania oporu całkowitego sieci wentylacyjnych normalnych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 70, Gliwice 1976

[125] Sułkowski J., Kolarczyk M., Domagała L.: Charakterystyka otoczenia podsieci i jej zastosowanie przy analizie przewietrzania oddziału. Materiały Sem." Vetr. a klim. v hlbinnych baniach" ČSVTS Koszyce 1981

[126] Sułkowski J.: Metody odwzorowania i miary struktur kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 115, Gliwice 1982

[127] Sułkowski J., Kolarczyk M.: Kreślenie schematu kanonicznego kopalnianej sieci wentylacyjnej z wykorzystaniem algorytmu podziału zbioru węzłów na warstwy. Sem."Vetranie a klimatizacja v hlbinnych. baniach" ZSVTS, Koszyce 1991

[128] Swami M., Tchułasiraman K.: Grafy sieti i ałgoritmy. "Mir", Moskwa 1984

[129] Tatt U.: Teoria grafow. "Mir", Moskwa 1988

[130] Tjan R.B., Potiomkin W.J.: Uprawlienije prowietriwanijem szacht. "Naukowa Dumka", Kijów 1977

[131] Tominaga Y., Komamura Y., Masuyama T., Tanaka T.: A flexible system for mine ventilation control using a ventilation transition diagram derived from a makroskopic charakteristic of the complex ventilation network. Materiały V Międz. Konf. Wentylacji Kopalń. RPA 1992

[132] Trutwin W.: O propozycji pewnej miary zagrożenia robotników w kopalnianej sieci wentylacyjnej z dymami pożarowymi. Archiwum Górnictwa t.13 1968/2

[133] Trutwin W., Kruszyński M., Wala A.: Analiza układów automatycznej regulacji wydatku przepływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Przegląd Górniczy 1971/7-8

[134] Trutwin W.: Recyrkulacja powietrza w gazowych wyrobiskach. Archiwum Górnictwa t. 26 1981/2

[135] Trutwin W.: O zastosowaniu minikomputerów do obliczeń wentylacyjnych w górnictwie. Zesz. Nauk. AGH nr 1099, s. Górnictwo, z. 126, Kraków 1986

[136] Trutwin W., Dziurzyński W., Tracz J.: Computer simulation of transients in mine ventilation. Materiały V Międzynarodowej Konferencji Wentylacji Kopalń. Johannesburg RPA 1992

[137] Wacławik J. i inni: Metody numeryczne rozwiązywania zagadnień wentylacji kopalń na maszynach cyfrowych. Archiwum Górnictwa t.25 1980/3

[138] Wacławik J., Roszczynialski W.: Aerologia Górnicza. PWN, Warszawa 1983

[139] Wacławik J. i inni: Algorytmy i programy wentylacji i klimatyzacji kopalń. "Śląsk", Katowice 1983

[140] Wang Y.J., Saperstein L.W.: Computer-aided solution of complex ventilation networks. Society of Mining Enginners AIME 1970/9 Tr.vol.247

[141] Wytyczne sporządzania map wentylacyjnych i schematów sieci wentylacyjnych kopalń. MGiE, Katowice 1978

[142] Zykow A.A.: Osnowy teorii grafow. "Nauka", Moskwa 1987

WPŁYW STRUKTURY KOPALNIANEJ SIECI WENTYLACYJNEJ NA WRAŻLIWOŚCI PRĄDÓW POWIETRZA PRZY ZMIANACH OPORÓW BOCZNIC

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem pracy jest struktura kopalnianej sieci wentylacyjnej oraz wrażliwości prądów powietrza na zmiany oporów bocznic. Przypadkowe lub zamierzone zmiany oporów pociągają za sobą zmiany w rozpływie powietrza. Przy ich ocenie mogą być przydatne informacje wynikające ze zmian elementarnych wydatków $d\dot{V}_i$ powstających przy elementarnych zmianach oporów dR_r w aktualnym stanie pracy sieci, czyli wrażliwości $\varepsilon_{ir} = d\dot{V}_i/dR_r$. Wrażliwości te są uzależnione od parametrów bocznic w aktualnym stanie pracy sieci oraz od jej struktury.

Przeanalizowano właściwości struktury istotne w przedmiotowym zagadnieniu. Opracowano ciąg metod, algorytmów i programów komputerowych badania struktury sieci dotyczący: podziału zbioru węzłów na warstwy (przydatnego przy rysowaniu schematu kanonicznego), wyznaczania przekroju całkowitego przez sieć poprowadzonego przez bocznice-odbiory powietrza (pomocnego przy analizie gospodarki powietrzem w kopalni), dostępności i osiągalności w zbiorze węzłów (co umożliwia szybkie wyznaczanie stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza).

Zwrócono uwagę na celowość przeprowadzania redukcji struktury sieci, gdzie podsieci są zastępowane jedną bocznicą. Ułatwia to przeprowadzanie obliczeń sieci oraz upraszcza dalsze metody analizy właściwości struktury.

Opracowano metodę i program komputerowy badania planarności sieci, w którym wyznacza się zbiór cykli-komórek umożliwiający zastosowanie twierdzenia Mac Lane'a i Whitney'a do rozstrzygania o planarności sieci.

W zagadnieniu przekątności bocznic opracowano metodę i program wyznaczający bocznice normalne i przekątne w sieci z wszystkich łańcuchów prowadzonych od węzła początkowego do końcowego sieci. Podano prosty sposób wyznaczania bocznic przekątnych w sieciach zredukowanych płaskich. Zwrócono uwagę na dużą liczbę bocznic przekątnych w sieciach niepłaskich. Wprowadzono klasyfikację bocznic wykorzystującą cechy struktury sieci. Wyróżniono cztery rodzaje tych bocznic. Najbardziej podatne na odwrócenia są

bocznice przekątne I rodzaju. Opracowano sposób wyznaczania tych bocznic w dowolnej sieci.

Przekątność może być także rozpatrywana przy dowolnym położeniu bocznicy źródłowej w sieci. Za celowe należy wtedy uważać wyszczególnienie par bocznic względem siebie normalnych i względem siebie przekątnych. W sieci płaskiej zredukowanej bocznicami normalnymi są wtedy bocznice posiadające wspólny węzeł ze źródłową oraz położone w dwu cyklach-komórkach, w których występuje źródłowa.

W sieciach zredukowanych acyklicznych można także wyróżnić bocznice quasi-równoległe, to jest takie, dla których nie istnieje cykl zewnętrzny zawierający te bocznice z tym samym znakiem oraz bocznice quasi-szeregowe, to jest takie, dla których nie istnieje przekrój całkowity przez sieć zawierający te bocznice z tym samym znakiem.

Opracowano metodę wyznaczania dowolnej kolumny macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic. Dotyczy to wrażliwosci pierwszego i drugiego rzędu. Wykazano symetrię znaków w tej macierzy oraz związki między wyrazami i-tego wiersza i i-tej kolumny.

Badania prawidłowości kształtowania się wrażliwości w sieci przeprowadzono z wykorzystaniem sieci dołączonej, w której źródło wymuszające przepływy-wrażliwości modelowane jest w bocznicy zmieniającej opór. W prawidłowościach dotyczących znaków wrażliwości istotny jest charakter bocznicy względem bocznicy zmieniającej opór. W sieciach normalnych znaki wrażliwości są jednoznaczne dla wszystkich par bocznic. W sieciach przekątnych płaskich i niepłaskich występują niejednoznaczności co do znaków wrażliwości. Dla par bocznic quasi-równoległych znaki wrażliwości są jednoznaczne (dodatnie), a także dla par bocznic quasi-szeregowych znaki wrażliwości są jednoznaczne (ujemne). Pary bocznic nie zaliczone jako quasi-równoległe lub quasi-szeregowe nie posiadają jednoznacznych znaków wrażliwości. Znaki te i wartości wrażliwości uzależnione są od parametrów bocznic w aktualnym stanie pracy sieci, w tym także od nachylenia charakterystyk wentylatorów głównych (lub charakterystyk zastępczych otoczeń podsieci).

Prawidłowości co do znaków wrażliwości pozwoliły na przeprowadzenie klasyfikcji zależności wydatków powietrza od oporów bocznic. Dla bocznic quasi-równoległych zależność ta jest rosnąca, dla bocznic quasi-szeregowych malejaca. Dla par bocznic nie zaliczonych do wymienionych zależność ta może być rosnąca lub malejąca. Mogą też wystąpić słabe zależności niemonotoniczne.

Podano wyniki pomiarów przeprowadzonych w wybranych fragmentach sieci wentylacyjnej czynnej kopalni, ilustrujące możliwe typy zależności wydatku

powietrza od oporu dowolnej bocznicy. Uzyskano w ten sposób potwierdzenie możliwości występowania w praktyce zależności niejednoznacznych.

W zakończeniu pracy podano wnioski oraz możliwe dalsze kierunki badań w zakresie struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej i wrażliwości prądów powietrza na zmiany oporów i innych parametrów bocznic.

THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF MINE VENTILATION NETWORKS ON THE SENSITIVITY OF AIR CURRENTS TO CHANGES IN THE RESISTANCE OF SIDE-BRANCHES

Summary

The paper deals with the structure of mine ventilation networks and the sensitivity of air currents to changes of the resistance of side-branches. Both accidental and intended changes of the resistance lead to changes in the distribution of air. In order to evaluate them it might be useful to gather information resulting from changes in the elementary airflow rate $d\dot{V}_i$ brought about by elementary changes of the resistance dR_r in the actual operative state of the network, i.e. the sensitivity $\varepsilon_{ir} = d\dot{V}_i / dR_r$. This sensitivity depends on the parameters of the branches in the operative state of the network and its structure.

The properties of the structure which are essential for this problem have been analysed. A sequence of methods, algorithms and copmuter programmes has been established concerning the structure of the network, viz. the division of a set of nodes into layers (coming in useful when a canonic diagram is to be drawn), the determination of a total cross-section of the network intersecting the branches as consumers of air (which may be utilized in the analysis of the air management in a mine), the accessibility and attainability in the set of nodes (which helps to determine quickly the danger zones conveyed by the currents of air).

Attention has been drawn to the feasibility of reducing the structure of the network, replacing subnetworks by only one branch. In this way it becomes easier to calculate the network, and further methods of analysing the characteristics of the structure are simplified.

A method and computer programme have been developed to investigate the planarity of networks, in which a set of cell-cycles is determined, so that Mac Lane's and Whitney's theorems might be applied to determine the planarity of a network.

With respect to the diagonality of the branches a method and programme have been developed to determine both normal and diagonal branches of all

the chains of the network spreading from the initial to the final node of the network. A simple way of determining diagonal branches in reduced flat networks has been suggested. Attention has been to drawn the large number of diagonal branches in not-flat networks. The applied classification of branches takes into account the structure of the network. Four kinds of such branches have been distinguished. Most susceptible to reversion are diagonal branches of the first type. A way of determinig them in any network has been worked out.

Diagonality can also be considered at any position of the source branch (forcing the flow) in the network. It seems to be feasible then to specify pairs of branches which are normal in relation to each other, and those which are diagonal to each other. In a flat reduced network as normal branches we consider those having a common node with the source and are situated in two cell-cycles, in which there is a source.

In acyclic reduced networks we can also distinguish quasi-parallel branches, i.e. branches for which there does not exist any exterior cycle comprising such branches with the same sign as well as quasi-serial branches, i.e. branches for which there does not exist a full cross-section through the network comprising such branches with the same sign.

A method has been worked out to determine any column in the matrix of sensitivity of the airflow rate to changes in the resistance of the branches. This concerns sensitivity of the first and second order. The symmetry of signs in this matrix has been shown up, as well as the relations between the expressions in the i-th row and i-th column.

In investigations concerning the regularity in the propagation of sensitivity in the network use has been made of an additional network, in which the source functioning flow-sensitivity is modelled by a branch in which the resistance is changing. Essential in this regularity of the signs of sensitivity is the character of the branch versus the branch with changing resistance. In normal networks (serial and parallel connections) the sensitivity signs are univocal for all pairs of branches. In diagonal flat and not-flat networks not all the signs of sensitivity are explicit. In the case of quasi-parallel branches the sensitivity signs are univocal (positive) as well as in the case of quasi-serial pairs of branches (negative).

Pairs of branches not classified as quasi-parallel nor quasi-serial have no explicit signs of sensitivity. These signs, as well as the values of sensitivity depend on the parameters of the branches in the actual operating state of the network, including the gradient of the characteris-

tics of the main fans (or the substitute characteristics of the environment of the sub-network).

The regularities concerning the signs of sensitivity have made it possible to classify the relation between the airflow rate and the resistance of the branches. In the case of quasi-parallel branches this dependence has a growing tendency, in the case of quasi-serial branches it decreases. In te case of branches not belonging to any of the aforesaid ones this relation may either grow or decrease. There may also occur weak non-monotonic relations.

The results of maesurements taken in selected parts of the ventilation network of an active colliery have been provided: they illustrate various possible types of relations between the volume flow of air and the resistance of some other branch. In this way it could be confirmed that practically the occurrence of non-explicit relations is possible.

Summing up, the paper suggests conclusions as well as possible further trends of investigating the structure of ventilation networks of mines and the sensitivity of air currents to changes of the resistance and other parameters of the branches.

ВЛЯНИЕ СТРУКТУРЫ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ

Р е з ю м е

Предметом работы является структура шахтной вентиляционной сети а также чувствительность воздушных потоков к изменениям сопротивлений ветвей. Случайные или намеренные изменения сопротивлений влекут за собой изменения в распределении воздуха. При их оценке полезными могут быть информации вытекающие из изменений элементарных расходов dV_i, возникающих при элементарных изменениях сопротивлений dR_r, в актуальном состоянии работы сети, т.е. чувствительности $\varepsilon_{ir} = dV_i/dR_r$. Эти чувствительности зависят от параметров ветвей в актуальном состоянии работы сети и от её стрыктуры.

Были проанализированы свойства структуры существенные для предметного вопроса. Была разработана последовательность методов, алгоритмов и компьютерных программ для исследования структуры сети относительно: деления множества узлов на слои (полезного при рисовании канонической схемы), определения полного сечения по сети проведенного по ветвиям-потребителям воздуха (пригодного для анализа распоряжения воздухом в шахте), доступности и достижимости во множестве узлов (что делает возможным быстрое определение зон опасности переносимых воздушным потоком)

Было обращено бнимание на целесообразность проведения редукции структуры сети, где подсети заменяются одной ветвью. Это облегчает выполнение расчетов сети, а также упрощает дальнейшие методы анализа свойств структуры.

Был разработан метод и компьютерная программа исследования планарности сети, в которой определяется множество цикловячеек, которые предоставляют возможность применить теорему Мак Лейна и Литнея для разрешения вопроса о планарности сети.

По вопросу о диагональности ветвей был разработан метод и программа для определения обычных (устойчивых) и диагональных ветвей в сети из всех цепей проводимых от начального до конечного узла сети. Дальше был представлен простой способ определения диагональных ветвей в редуцированных плоских сетях. Было обращено внимание на большое количество диагональных ветвей в неплоских сетях. Была проведена классификация ветвей использующая свойства структуры сети. Были выделены четыре вида этих ветвей. Самыми чувствительными к опрокидыванию являются диагональные ветви I вида. Был разработан метод определения этих ветвей в любой сети.

Диагональность можно рассматривать тоже при любом положении ветви-источника протекания в сети. Целесообразным надо тогда признать перечисление пар ветвей обычных (устойчивых) и диагональных по отношению друг к другу. В плоской редуцированной сети обычными являются тогда ветви обладающие общим узлом с ветвью-источником и расположенные в двух циклах-ячейках, в которых находится ветвь-источник.

В редуцированных ациклических сетях можно выделить также квазипараллельные ветви, т.е. такие, для которых не существует внешний цикл содержащий эти ветви с таким-же знаком, и квазипоследовательные ветви т.е. такие, для которых не существует полное сечение по сети содержащее эти ветви с тем-же знаком.

Был разработан метод определения столбца матрицы чувствительности расходов воздуха к изменениям сопротивлений ветвей. Это относится к чувствительности так первого как и второго ряда. Была выявлена симметрия знаков в этой матрицы и отношение между членами i-той строки и i-того столбца.

Топологические исследования закономерности распространения чувствительности в сети, были выполнены с использованием присоединенной сети, в которой источник вынуждающий протекания-чувствительности моделируется в ветви изменяющей сопротивление. Для закономерностей относящихся к знакам чувствительности существенным является характер ветви по отношению к ветви изменяющей сопротивление. В сетях параллельно-последовательных знаки чувствительности однозначны для всех пар ветвей. В диагональных плоских и неплоских сетях выступают неоднозначности относительно знаков чувствительности. Для пар квазипараллельных ветвей знаки чувствительности однозначны (положительные),

также для пар квазипоследовательных ветвей знаки чувствительности однозначны (отрицательхые). Пары ветвей не причисленные ни к квазипараллельным ни к квазипоследовательным не обладают однозначными знаками. Знаки те и значения чувствительности зависят от параметров ветвей в актуальном состоянии работы сети, в том числе и от наклона характеристики главных вентиляторов (или от наклона приведенной характеристики вентилятора-окружения подсети).

Закономерности относительно знаков чувствительности позволили провести классификацию зависимостей расходов воздыха от сопротивлений ветвей. Для квазипараллельных ветвей эта зависимость является возрастающей, а для квазипоследовательных ветвей - убывающей. Для пар ветвей не отнесенных к названным выше, эта зависимость может являться возрастающей или убывающей. Могут выступить тоже незначительные немонотонные зависимости.

Были даны результаты измерений проведённых на выбранных участках вентиляционной сети действующей шахты уллюстрирующие возможные типы зависимости расхода воздыха от сопротивлений ветвей. Таким образом, было получено подтверждение возможности выступления на практике неоднозначных зависимостей.

В заключении были сделаны выводы и указаны возможные дальнейшие направления исследований в области структуры шахтной вентиляционной сети и чувствительности воздушных потоков к изменениям сопротивлений и других параметров ветвей.

18.200,-

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P.3351/93/214