

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ GÓRNICCTWA I GEOLOGII

PRACA DOKTORSKA

Temat:

**Metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych
kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne
między podsieciami wentylatorów głównych**

Autor: mgr inż. Grzegorz Pach

Promotor: dr hab. inż. Jan Drenda

Prof. nzw. w Politechnice Śląskiej

Gliwice, wrzesień 2008

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	5
1.1. Wstęp	5
1.2. Temat, teza, cel i zakres pracy.....	7
1.3. Założenia upraszczające przyjęte w pracy.....	10
1.4. Dalsze uzasadnienie celowości przeprowadzanych badań.....	11
2. Przegląd i analiza metod obliczeń naturalnego i wymuszonego rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej.....	21
2.1. Rodzaje obliczeń rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej.....	21
2.2. Metody obliczeń naturalnego rozplywu powietrza.....	25
2.3. Metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza.....	32
2.4. Zapotrzebowanie powietrza w odbiorach.....	43
3. Analiza metod badania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej.....	46
3.1. Kopalniana sieć wentylacyjna.....	46
3.2. Prawa równowagi dla kopalnianej sieci wentylacyjnej.....	51
3.3. Przekrój całkowity przez sieć przechodzący przez bocznicę odbiorów powietrza.....	53
3.4. Analiza charakteru bocznic ze względu na ich przekątność.....	57
3.5. Badanie planarności sieci.....	63
3.6. Wydzielanie podsieci.....	67
3.7. Pozostałe metody analizowania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej.....	71
4. Analiza metod wyznaczania prądów zależnych w tym w szczególności prądów zależnych występujących pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.....	74
4.1. Wprowadzenie.....	74
4.2. Zalety oraz wady występowania prądów zależnych w kopalnianych sieciach wentylacyjnych.....	77
4.3. Metody wyznaczania prądów zależnych w kopalnianych sieciach wentylacyjnych.....	79
5. Opracowanie metod obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne, między podsieciami wentylatorów głównych, uwzględniających minimalizację mocy użytecznej wentylatorów.....	90

5.1. Rozpływ wymuszony jako zagadnienie programowania matematycznego.....	90
5.2. Badanie kształtu funkcji mocy w zagadnieniach przepływu wymuszonego w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych.....	96
5.3. Metoda obliczeń przepływu wymuszonego powietrza dla sieci wentylacyjnych nie zawierających zużytych prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.....	102
5.4. Zastosowanie metody złotego podziału do obliczeń przepływu wymuszonego w sieciach z dwoma wentylatorami głównymi zawierającymi zużyte prądy zależne łączące ich podsieci.....	107
5.5. Charakterystyki sumarycznej mocy wentylatorów jako funkcji wydatku powietrza w zagadnieniu obliczania przepływu wymuszonego.....	115
5.6. Szczególne rodzaje sieci wentylacyjnych dla których można zastosować metody złotego podziału lub charakterystyki zastępczej.....	134
5.7. Wrażliwość wydatku powietrza w bocznicy na zmiany wydatku powietrza w innych bocznicach.....	137
5.8. Metoda obliczeń przepływu wymuszonego w sieciach wentylacyjnych z dowolną liczbą wentylatorów głównych wykorzystująca wrażliwość mocy wentylatorów głównych.....	153
6. Przykład optymalizacji mocy użytecznej wentylatorów głównych w obliczeniach przepływu wymuszonego.....	160
6.1. Struktura wybranej sieci oraz przyjęte uproszczenia.....	160
6.2. Przebieg obliczeń optymalizacyjnych.....	164
6.3. Wnioski z rozdziału 6.....	172
7. Wnioski końcowe.....	173

Spis oznaczeń:

w_i	– węzeł i-ty,
m	– liczebność zbioru bocznic,
n	– liczebność zbioru węzłów w sieci,
v	– liczba cykloematyczna sieci,
V_{sw}, V_{zu}	– liczby cykloematyczne strefy świeżego i zużytego powietrza,
l_{pc}	– liczba bocznic zaliczonych do przekroju całkowitego przez odbiory powietrza,
l_w	– liczba wentylatorów głównego przewietrzania,
l_{tr}	– liczba tam regulacyjnych,
R_i	– opór i-tej bocznicy,
V_i	– wydatek objętościowy powietrza w i-tej bocznicy,
V_{wi}	– wydatek objętościowy powietrza na i-tym wentylatorze,
W_i	– spadek naporu w i-tej bocznicy,
c_{ki}	– element macierzy cyklowo-bocznikowej,
ΔV_i	– poprawka wydatku powietrza,
R_{tr}	– opór tamy regulacyjnej,
H_g	– spiętrzenie wentylatora głównego,
H_p	– spiętrzenie wentylatora pomocniczego,
N_i	– dyssypacja mocy w i-tej bocznicy,
N_u	– moc użyteczna,
s_{ji}	– element macierzy incydencji węzłowo-bocznikowej,
σ	– miara złożoności sieci,
w_i	– węzeł i-ty,
A	– macierz przejść,
L	– macierz osiągalności,
w_{ps}	– węzeł początkowy sieci,
w_{ks}	– węzeł końcowy sieci,
w_{pb}	– węzeł początkowy bocznicy,
w_{kb}	– węzeł końcowy bocznicy,
w_{pp}	– węzeł początkowy podsieci,
w_{kp}	– węzeł końcowy podsieci,
$\text{indeg } w_i,$	– stopnie wejściowy i wyjściowy węzła,
$\text{outdeg } w_i$	– stopnie wejściowy i wyjściowy węzła,
k	– współczynnik zmniejszania przedziału w metodzie złotego podziału,
V_{pc}	– całkowity wydatek w bocznicach należących do przekroju całkowitego,
d	– długość przedziału niepewności w metodzie złotego podziału

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Górnictwo węgla kamiennego zarówno w Polsce, jak i w świecie posiada wielowiekową tradycję. W ciągu kilkuset lat przemysł wydobywczy ulegał istotnym przekształceniom pod względem technicznym, organizacyjnym oraz własnościowym. Powyższe przekształcenia występowały również w procesie restrukturyzacji polskiego górnictwa węglowego, który rozpoczął się na początku lat 90-tych. Zmiany prowadziły do koncentracji i intensyfikacji wydobywania oraz do systematycznego zmniejszenia liczby zbędnych wyrobisk, w tym likwidacji starych, nieużywanych poziomów. W tych latach notuje się liczne przypadki nie tylko likwidacji, lecz także zespalania kopalń. W zespolonych kopalniach występują nowe problemy, również związane z przewietrzaniem wyrobisk podziemnych. Nowo powstałe struktury kopalnianych sieci wentylacyjnych nadal jednak cechują się znaczną złożonością.

Polskie warunki geologiczno-górnice przyczyniają się do występowania licznych zagrożeń naturalnych, w szczególności zagrożenia tąpniętami, metanowego, pożarowego, pyłowego i ciepłego. Na wielkość tych zagrożeń mają wpływ [11]:

- długi okres prowadzenia robót eksploatacyjnych,
- głębokość eksploatacji przekraczająca 1000 m,
- koncentracja robót górniczych,
- duży dopływ ciepła z górotworu i od urządzeń energomechanicznych,
- eksploatacja podziemowa.

Prawidłowe przewietrzanie kopalń pozwala na zmniejszenie niektórych z wymienionych zagrożeń, a poprzez to wpływa na zapewnienie większego bezpieczeństwa pracy załogi. Jednym z celów wentylacji kopalni jest zapewnienie określonej ilości powietrza w miejscach pracy (w tzw. odbiorach powietrza) to jest w ścianach, w komorach oraz w przodkach [35, 39, 47, 52, 58, 72, 77, 107, 110, 119, 128]. Pracujące w tych miejscach liczne urządzenia pogarszają w znaczący sposób parametry powietrza, zarówno od strony

własności fizycznych, jak i ze względu na skład chemiczny. W celu zapewnienia pracownikom bezpieczeństwa i względnego komfortu pracy występuje konieczność doprowadzenia świeżego (nie zanieczyszczonego) powietrza do wyżej wymienionych miejsc. Dostarczenie powietrza do odbiorów wymaga, zgodnie z aktualnymi przepisami górnictwa oraz względami bezpieczeństwa, przewietrzania kopalni za pomocą wentylatorów głównych zlokalizowanych na powierzchni przy szybach wydechowych. Praca wentylatorów niesie za sobą znaczne koszty finansowe (w tym opłaty za wykorzystaną energię, nadzór urządzeń oraz ich zakup i utrzymanie), na które wpływają między innymi moce wentylatorów. Wzrost kosztów związanych z zakupem energii wynika ze stosowania wentylatorów o coraz większych spiętrzeniach i wydajnościach, które powodują wzrost mocy użytecznej i całkowitej. Wiadomym jest, że wentylatory głównego przewietrzania są urządzeniami, które pracują w sposób nieprzerwany, zapewniając ciągły przepływ powietrza przez wyrobiska górnicze.

W procesie restrukturyzacji górnictwa w kopalnianych sieciach wentylacyjnych występują liczne zmiany. Sieci kopalniane posiadają różne struktury (wynikające min. ze sposobu zalegania złóż), co jest również ważne w procesie kierowania przewietrzaniem. W niektórych przypadkach (likwidacja kopalń oraz procesy związane z koncentracją wydobycia), struktury przestrzenne kopalń oraz ich sieci wentylacyjnych ulegają uproszczeniu. Jest to związane ze zmniejszeniem się liczby wyrobisk przygotowawczych oraz ścian i komór funkcyjnych. Likwidacji podlegają także stare poziomy. W przypadkach zespolenia kopalń, nowo powstałe sieci wentylacyjne często jednak charakteryzują się bardziej złożoną strukturą oraz zwiększonym zapotrzebowaniem na powietrze. Analiza struktur sieci wydaje się być konieczną, w aspekcie racjonalnej gospodarki powietrzem kopalnianym [72, 77] i innych właściwości sieci takich jak: przekątność, planarność, czy też możliwość wyodrębniania podsieci wentylacyjnych. Informacje uzyskane na podstawie tych badań, mogą ułatwić podejmowanie decyzji dotyczących wentylacji danej kopalni.

Szczególnym badaniom należy poddać przekątność sieci wentylacyjnej oraz występowanie prądów zależnych w strefie świeżej i zużytej, zwłaszcza prądów zależnych w strefie zużytej występujących pomiędzy podsieciami wentylatorów głównego przewietrzania. Występowanie prądów zależnych komplikuje obliczenia rozplywu powietrza w sieciach wentylacyjnych. Uwaga ta dotyczy zarówno obliczeń rozplywu naturalnego, jak i wymuszonego.

Kolejny istotny problem to dostarczanie wystarczającej ilości powietrza do odbiorów. Pośrednio jest on związany z obliczeniami rozplywu wymuszonego (wcześniejsza nazwa tego

zagadnienia to regulacja sieci wentylacyjnej). Poszukiwany rozptyw powietrza musi miec na uwadze zagrozenia wystepujace w miejscach pracy. Zadzany rozptyw realizuje sie za pomoca tam regulacyjnych i wentylacyjnych oraz wentylatorow glownych i pomocniczych. Zmiana parametrów wymienionych elementów skutkuje powstaniem nowego rozptywu powietrza w sieci. W latach poprzedzających powszechne stosowanie techniki komputerowej zmiany przeprowadzano metoda prób i błędów, aż do uzyskania požadanego rozptywu powietrza. W praktyce próby te odbywały sie poprzez zmianę parametrów jednego lub kilku elementów sieci, następnie przeprowadzano pomiary wentylacyjne. Obecnie kopalnie posiadają modele cyfrowe własnych sieci wentylacyjnych zapisywane w komputerze, jak również programy pozwalające na obliczanie rozptywu powietrza. Jednakże w obliczeniach tych także często stosuje sie metode prób dotyczącą położenia i oporów tam regulacyjnych.

Jednocześnie kolejnym celem ekonomicznej gospodarki powietrzem jest obniżanie mocy wentylatorów. Obydwa wymienione cele znajdują sie wobec siebie w sprzeczności. W takim przypadku istotnym jest znalezienie rozwiązania optymalnego, spełniającego wymogi dotyczące ilości dostarczanego powietrza, jak również minimalizującego moc wentylatorów. Zagadnienie to w teorii programowania matematycznego nazywane jest minimalizacją z ograniczeniami. Ze względu na charakter funkcji celu i ograniczeń jest to problem programowania wypukłego. Praca niniejsza dotyczy postawionego powyżej problemu.

1.2. Temat, teza, cel i zakres pracy

W kopalniach węgla kamiennego wraz ze wzrostem głębokości eksploatacji następuje bardzo znaczący wzrost zagrożeń: cieplnego, metanowego, pożarowego oraz wybuchem pyłu węglowego. Wskutek wzrastających zagrożeń występuje konieczność racjonalnej gospodarki powietrzem, której celem jest zapewnienie odpowiedniej ilości powietrza w odbiorach – oddziałach wydobywczych, przygotowawczych i w komorach. Zapewnienie odpowiedniej ilości powietrza wpływa na bezpieczeństwo pracy załogi. Znacznie wzrastają koszty przewietrzania wynikające z pracy wentylatorów glownych o coraz to większych spiętrzeniach, wydajnościach i mocach. Sieci kopalniane posiadają różne struktury, co jest również ważne w procesie kierowania przewietrzaniem. Jak już wspomniano w obliczeniach wymaganego rozptywu powietrza istotne jest występowanie prądów zależnych w strefach powietrza świeżego i zużytego oraz zużytych prądów zależnych występujących pomiędzy

podsieciami wentylatorów głównych. Dla takich przypadków słabo rozpoznane są metody obliczeń rozplywu wymuszonego w sieciach projektowanych i istniejących. Dotyczy to zwłaszcza sieci, w których występują zużyte prądy zależne, pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. W sieciach takich, co zostanie pokazane w pracy, istnieje wiele rozwiązań dopuszczalnych dotyczących tego zagadnienia. Rozwiązania te różnią się od siebie niezbędnymi parametrami pracy wentylatorów głównego przewietrzania, w tym także różna może być potrzebna ich moc użyteczna.

Przedstawione uwagi skłoniły do podjęcia badań w tym zakresie. Wyniki tych badań ujęte są w pracy doktorskiej na temat:

„Metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne między podsieciami wentylatorów głównych”.

W pracy postawiono następującą tezę:

Istnieje możliwość opracowania metod obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne między podsieciami wentylatorów głównych, uwzględniających minimalizację mocy użytecznej wentylatorów głównych.

Cel naukowy pracy:

- opracowanie metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne występujące pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych, uwzględniających minimalizację mocy użytecznej tych wentylatorów.

Cele praktyczne pracy:

- wykazanie pozytywnego i negatywnego znaczenia prądów zależnych w tym w szczególności zużytych prądów zależnych występujących pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych,
- opracowanie dalszych sposobów obniżenia mocy użytecznej wentylatorów głównych.

W rozdziale drugim przeprowadzono przegląd metod dotyczących obliczeń rozplywu naturalnego i wymuszonego powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Wskazane zostały różnice dotyczące danych wejściowych oraz uzyskiwanych informacji wynikowych. Wskazano na istotne znaczenie struktury sieci, także w zagadnieniu obliczeń rozplywu wymuszonego. W rozdziale tym pokrótce omówiono także zagadnienie zapotrzebowania powietrza w miejscach pracy, uwzględniające zagrożenia naturalne oraz przepisy górnicze.

Analiza niektórych metod badania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej przedstawiona została w rozdziale trzecim. W rozdziale tym omówiono również poszczególne elementy wchodzące w skład sieci wentylacyjnej. Pokazano podstawowe prawa równowagi obowiązujące w sieci. Wskazano na użyteczność posługiwania się przekrojem całkowitym przez sieć oraz rozdziałem sieci na strefę świeżą i zużytą. Przypomniane zostały zagadnienia dotyczące takich cech sieci wentylacyjnej jak: planarność, przekątność oraz możliwość wydzielania podsieci. Wskazano inne użyteczne metody analizowania struktury sieci.

Rozdział czwarty został poświęcony prądom zależnym. Przedstawiono rodzaje prądów powietrza w sieciach wentylacyjnych, omówiono wady oraz zalety wynikające z występowania tych prądów powietrza. Opisano metody wyznaczania prądów zależnych oraz zwrócono szczególną uwagę na zużyte prądy zależne występujące pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.

Rozdział piąty dotyczy obliczeń rozplywu wymuszonego w kopalnianej sieci wentylacyjnej. W metodach obliczeń przedstawionych w tym rozdziale położono nacisk na kryterium minimalizacji mocy użytecznej wentylatorów głównych. Przypomniano, że w sieciach z jednym wentylatorem oraz w sieciach nie posiadających prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych, rozwiązanie optymalne ze względu na zadane kryterium mocy użytecznej przy regulacji dodatniej może być osiągnięte przez założenie zerowego oporu tamy regulacyjnej na drodze krytycznej. Pokazano, że w przypadku sieci z prądami zależnymi występującymi pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych, możliwe jest uzyskanie wielu różnych rozwiązań spełniających zadane założenia. W rozwiązaniach tych opór jednej z tam regulacyjnych jest zerowy, sumy mocy użytecznych wentylatorów głównych w poszczególnych rozwiązaniach nie są jednakowe. Spośród wielu rozwiązań znaleźć można rozwiązanie optymalne z uwagi na minimum sumy mocy użytecznych tych wentylatorów. Przedstawiony został dowód wykazujący wypukłość zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Została wskazana metoda złotego podziału, jako metoda pozwalająca na spełnienie kryterium minimalizacji mocy użytecznej, przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z żadanego rozplywu wymuszonego. Metoda ta może mieć zastosowanie jedynie w przypadkach sieci z dwoma wentylatorami. Dla sieci o liczbie wentylatorów większej niż dwa, zaproponowano metodę wykorzystującą kierunek poprawy funkcji celu.

Metody podane w rozdziale piątym zweryfikowano w rozdziale szóstym w oparciu o rzeczywistą sieć wentylacyjną kopalni miedzi. Przedstawiono koszty wynikające z pracy wentylatorów głównego przewietrzania dla różnych rozwiązań postawionego problemu.

Wnioski końcowe zawarte w rozdziale siódmym kończą niniejszą pracę.

1.3. Założenia upraszczające przyjęte w pracy

Rozwiązanie zagadnienia postawionego w temacie i w tezie niniejszej pracy bez jakichkolwiek uproszczeń, byłoby problemem skomplikowanym. Trzeba zauważyć, że zagadnienie wymiany ciepła, stanów nieustalonych w sieci wentylacyjnej i gazodynamiki wymaga dodatkowych badań, które nie zostały wykonane w pracy. Nad wymienioną problematyką prowadzone są badania w wielu polskich i światowych ośrodkach naukowych. Należy mieć nadzieję, że w przyszłości możliwe będzie posługiwanie się pełnym opisem przepływu powietrza, uwzględniającym nie tylko stany normalne, lecz również stany awaryjne, we wszelakich zagadnieniach dotyczących kopalnianej sieci wentylacyjnej. W pracy przyjęto więc następujące uproszczenia:

- gęstość powietrza jest wartością stałą, stąd badane sieci należy traktować jako pasywne,
- spadek naporu powietrza jest wprost proporcjonalny do kwadratu wydatku powietrza przepływającego w bocznicy,
- przepływ powietrza w bocznicy jest przepływem jednowymiarowym wzdłuż linii prądu,
- obliczenia prowadzone są dla stanów ustalonych,
- struktura sieci wentylacyjnej oraz opory bocznic są znane,
- znane jest zapotrzebowanie powietrza we wszystkich bocznicach odbiorów.

W przyszłych pracach badawczych wyżej wymienione uproszczenia powinny ulegać osłabieniu. Jednakże związane jest to z dokładnością danych uzyskiwanych z pomiarów dołowych, a poprzez to z rozwojem urządzeń pomiarowych.

Nadmienić także należy:

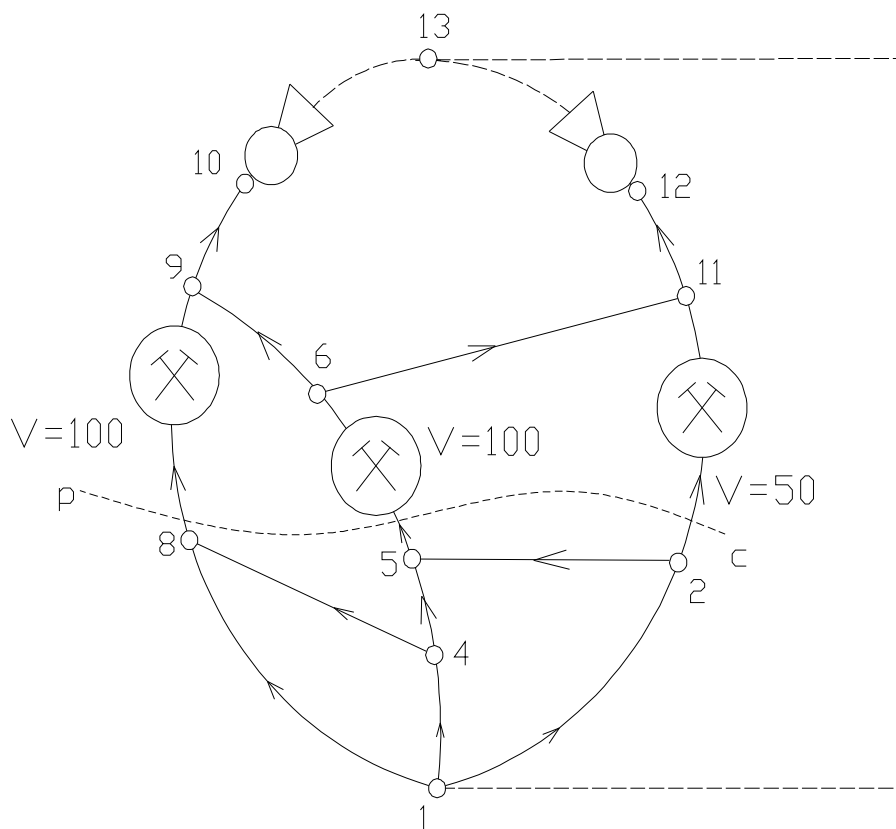
- przeprowadzone badania przy przyjętych założeniach upraszczających dalej uwypuklają znaczenie struktury sieci. Rozpatrywanie tego zagadnienia dla sieci aktywnej mogło by nie do końca wyjaśnić uzyskane prawidłowości wynikające wyłącznie ze struktury sieci,
- przeprowadzone obliczenia rozplywu wymuszonego dla sieci pasywnej mogą stanowić pierwszy etap obliczeń dla modelu sieci uwzględniającego inne procesy występujące w kopalni. Praktyka obliczeń sieci zna dużo takich przykładów.

1.4. Dalsze uzasadnienie celowości przeprowadzanych badań

Kopalniane sieci wentylacyjne w większości mają charakter przekątny. W przypadku obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza możliwe jest rozdzielnie sieci za pomocą przekroju całkowitego [74, 77] na dwie strefy: strefę powietrza świeżego i strefę powietrza zużytego. Prądy zależne występujące w obydwu strefach utrudniają obliczenia rozplywu wymuszonego - powstały układ równań przestaje być liniowym. Obecność prądów zależnych, oprócz komplikowania się obliczeń, wpływa również na wielkość stref zagrożeń przenoszonych w sieci przez prądy powietrza. Dotyczy to zagrożenia dymami i gazami pożarowymi, powstawania pól metanowych, przenoszenia zagrożenia pyłowego i radiacyjnego [91, 138, 145].

Należy zauważyć, że kopalnie z jednym szybem wydechowym, przy którym instalowana jest stacja wentylatorów, stanowią mniejszość w polskim górnictwie węglowym. Liczba kopalń z kilkoma szybami wydechowymi stanowi zdecydowaną większość. Proces zespalandia kopalń stanowi tutaj znaczącą rolę w zmniejszaniu się liczby szybów wydechowych w zakładach górniczych. Należy się spodziewać, że liczba prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych wskutek procesu restrukturyzacji będzie wzrastała. Występowanie tych prądów może wpływać na parametry pracy wentylatorów głównych oraz na koszty energii elektrycznej. W kosztach kopalnianych znaczącą część stanowią koszty głównego przewietrzania. Na przykład w Katowickim Holdingu Węglowym [97, 101] w dniach roboczych udział w zużyciu energii elektrycznej przez wentylatory głównego przewietrzania wynosi 14%, zaś w dni wolne wzrasta do 30% całkowitego zużycia energetycznego kopalni. Rząd wielkości dziennego zużycia energii elektrycznej przez wentylatory główne w KHW wynosi kilkadziesiąt tysięcy kWh, co skutkuje opłatami za zużytą energię elektryczną rzędu kilkudziesięciu milionów złotych [96].

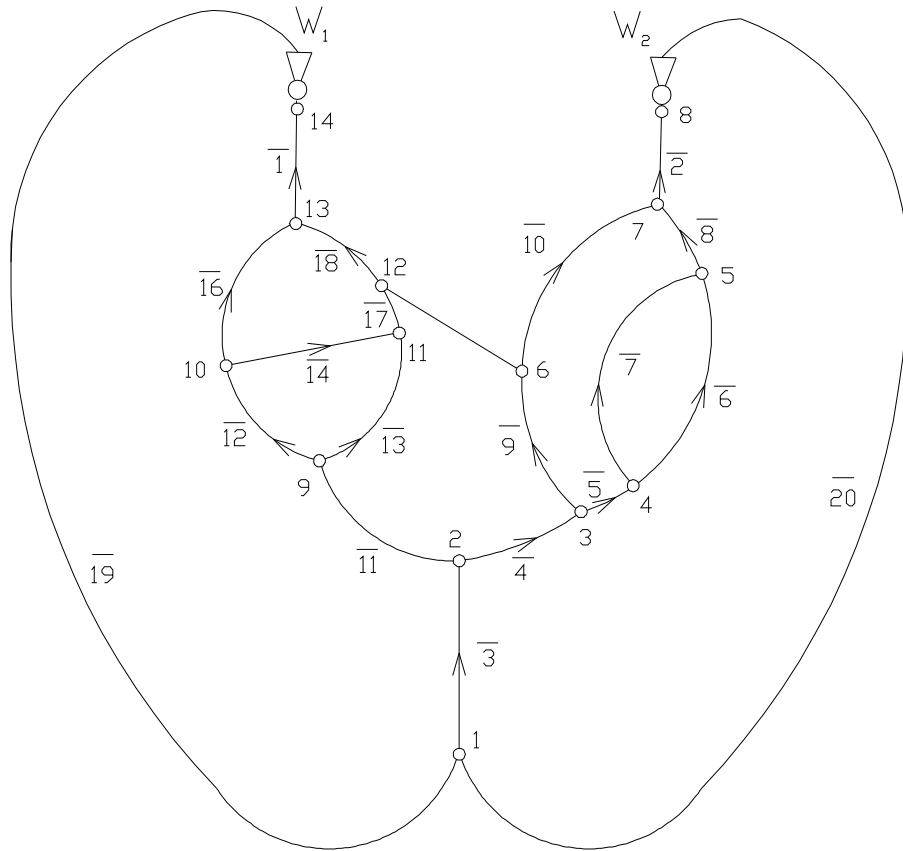
Przypadki sieci wentylacyjnych w których występują zużyte prądy zależne łączące podsieci wentylatorów głównych znane są w literaturze i w praktyce kopalnianej. W pracy H. Bystronia z 1955 roku [14] można znaleźć prosty schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej, który został przedstawiony na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Schemat kanoniczny sieci z dwoma wentylatorami głównymi i z zależnym prądem powietrza w strefie zużytej pomiędzy podsieciami tych wentylatorów

W przedstawionej sieci istnieją 3 odbiory powietrza w bocznicach (wg numeracji węzłów) 8 9, 5 6 oraz 2 11. Strefa powietrza świeżego zawiera dwa prądy zależne 4 8 oraz 2 5. Powietrze zużyte z oddziału z bocznicy 5 6 kierowane jest do dwóch szybów wydechowych. Bocznice 6 9 oraz 6 11 łączą więc ze sobą podsieci dwóch wentylatorów głównych. Warto zauważyć, że likwidacja którejkolwiek z tych bocznic spowoduje nie tylko brak połączenia pomiędzy podsieciami, lecz również brak jakiegokolwiek prądu zależnego w strefie zużytej. Wymienione prądy zależne (bocznica 6 9, 6 11) są oczywiście przekątne. Zmiany oporów bocznic w sieci mogą spowodować odwrócenie się kierunku przepływu powietrza w tych bocznicach. Zawsze jednak występuje następująca prawidłowość: zużyte powietrze przynajmniej z jednego odbioru odprowadzane jest do obydwu wentylatorów.

Interesujący przykład sieci wentylacyjnej pokazany jest w pracy S. Białasa, W. Mikołajczyka oraz M. Brannego [7].

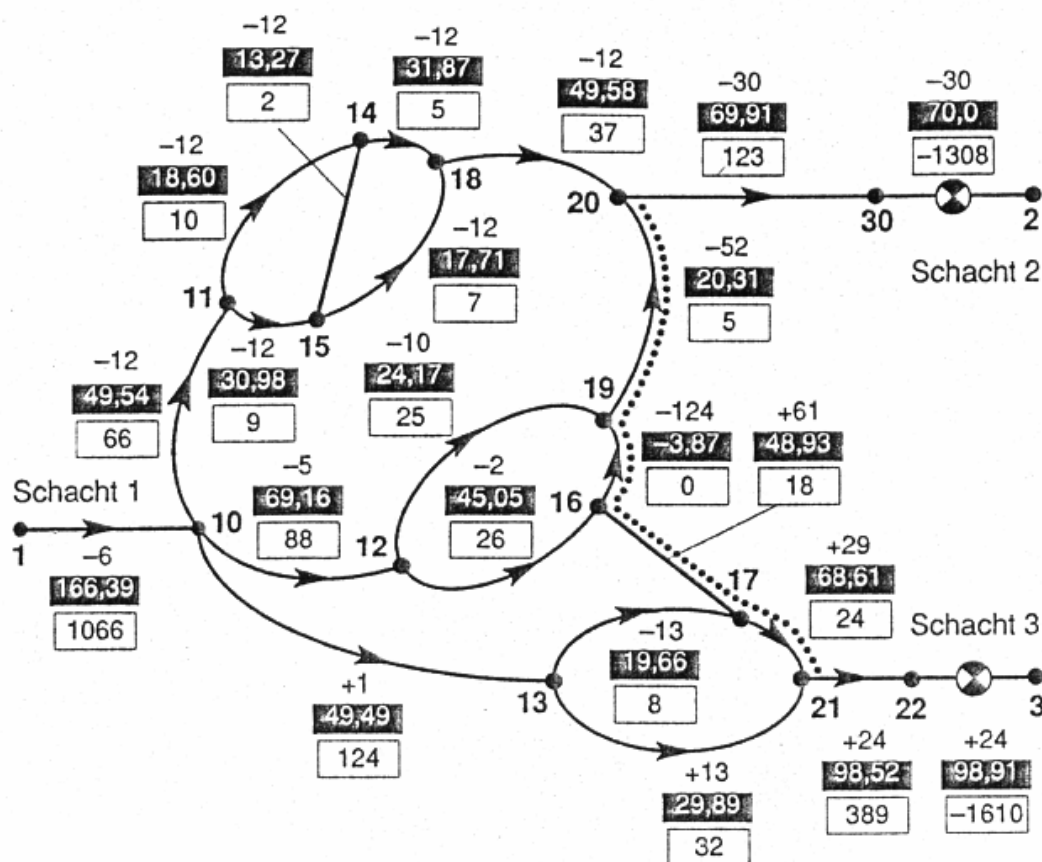


Rys. 1.2. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej (zaczepnięty z pracy [7])

Przekątna bocznica 6 12 (rys. 1.2.) w strefie zużytej łączy podsieci wentylatorów głównych W_1 i W_2 . Po ewentualnym odrzuceniu tej bocznicy lewa „gałąź” sieci (będąca podsiecią wentylatora W_1) zawiera sieć przekątną prostą, natomiast prawa „gałąź” posiada charakter sieci normalnej. Obliczenia rozplywu wymuszonego przy braku wspomnianej bocznicy są bardzo proste. Istniejąca bocznica 6 12, będąca prądem zależnym łączącym podsieci wentylatorów W_1 i W_2 , umożliwia jednak skierowanie pewnej ilości zużytego powietrza z „gałęzi” prawej do wentylatora W_1 lub z „gałęzi” lewej do wentylatora W_2 . Autorzy pracy [7] w pokazanych obliczeniach rozplywu wymuszonego założyli wydatki powietrza w bocznicach odbiorów oraz dodatkowo założony został także wydatek powietrza w przedmiotowym prądzie zależnym. W tym przykładzie pozwoliło to na określenie wymaganego rozplywu powietrza w całej sieci. W znacznym stopniu uprościło to dalsze obliczenia.

W literaturze niemieckiej, dotyczącej analizowanego zagadnienia, również można znaleźć przykłady występowania zależnych prądów powietrza w strefie zużytej łączących

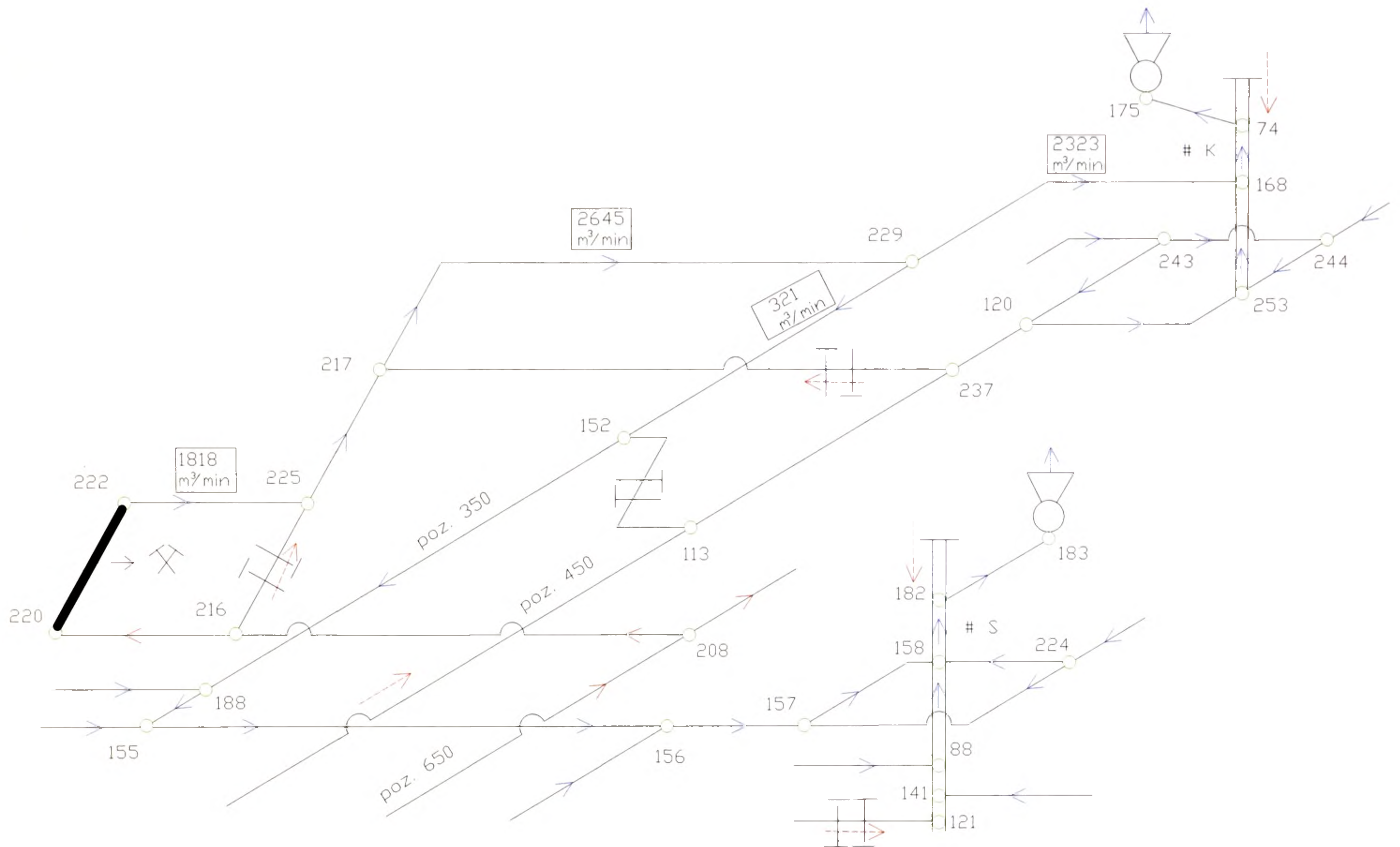
podsieci wentylatorów głównych. J. Linhart w artykule [99] przedstawia schemat kanoniczny sieci (rys. 1.3.) z dwoma takimi wentylatorami.



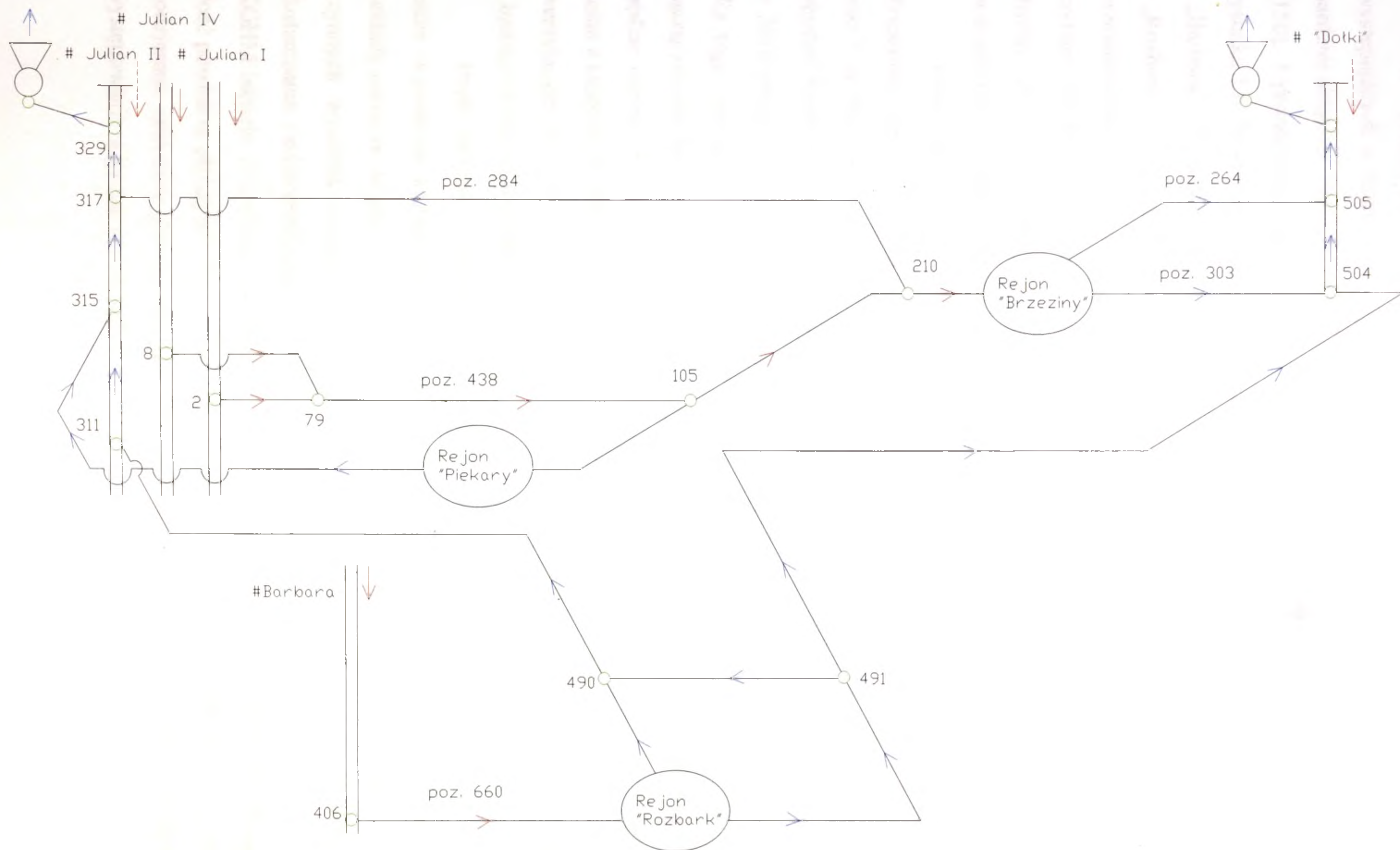
Rys 1.3. Przykład sieci wentylacyjnej z prądami zależnymi w strefie zużytej (zaczepnięty z pracy Linharta)

Wylotowy prąd powietrza z odbioru z bocznicy 12 16 w węźle 16 rozdziela się częściowo do szybu wydechowego drugiego (droga wg numeracji węzłów 16 19 20 30 2) oraz częściowo do szybu wydechowego trzeciego (droga 16 17 21 22 3). Bocznice 16 17, 17 21, 16 19, 19 20 stanowią połączenie pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.

Bardziej złożony przykład sieci wentylacyjnej, w której występują prądy „międzysystemowe” został pokazany w pracy R. Pollaka i J. Thomk`a [111]. Na przedstawionym schemacie (rys. 1.4.) w węźle 58 następuje rozdzielenie się powietrza zużytego, pochodzącego z kilku oddziałów, do dwóch szybów wydechowych. Wskazuje to na istnienie omawianych rodzajów prądów powietrza w strefie zużytej, łączących podsieci wentylatorów głównych.



Rys. 1.5. Fragment schematu przestrzennego KWK „Sz” – prądy „międzysystemowe”

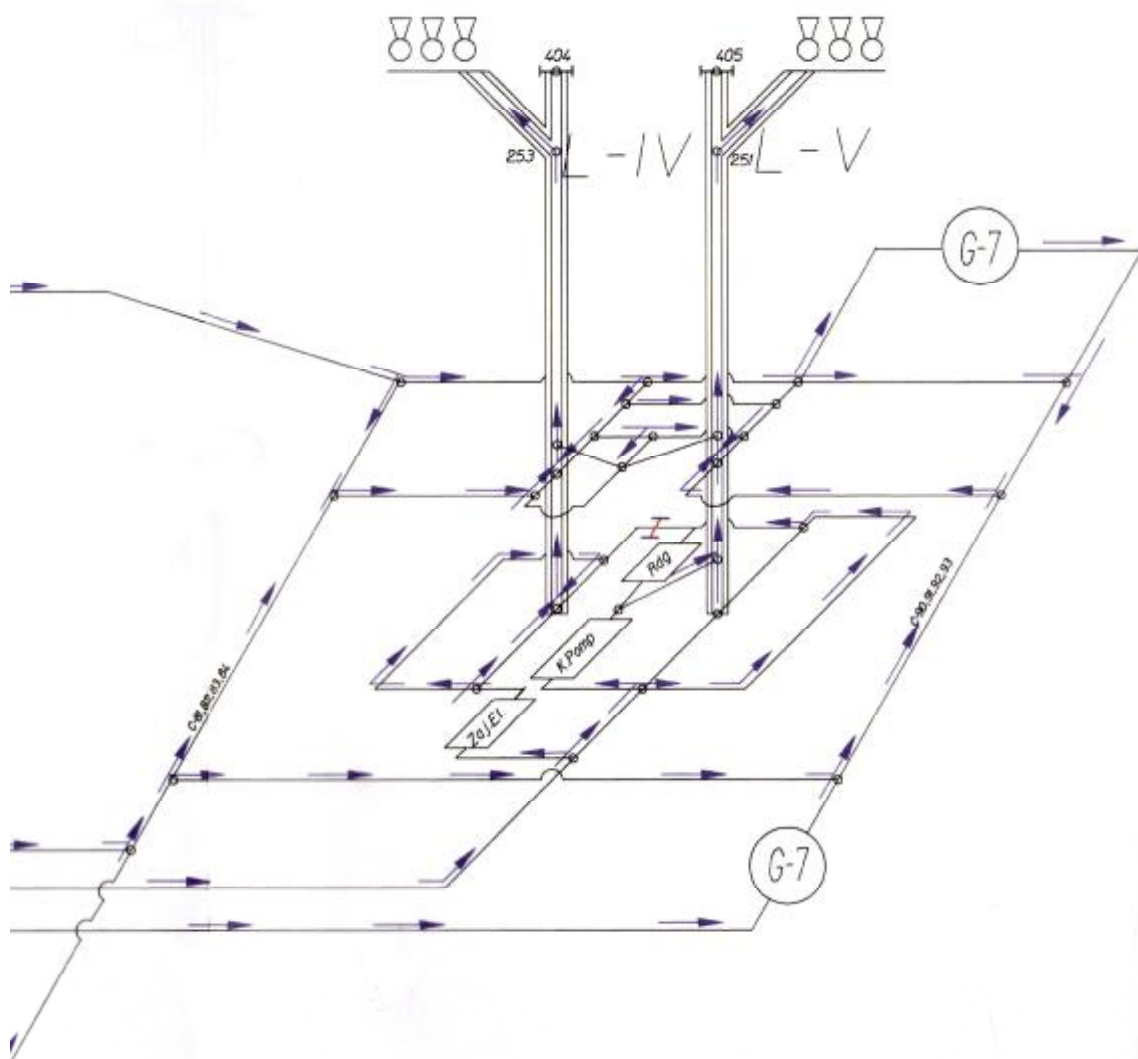


Rys. 1.6. Uproszczony perspektywiczny schemat przestrzenny ZG „Piekary”

W przyszłości należy się spodziewać, że zagadnienie prądów zależnych występujących w strefie zużytej pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych będzie coraz bardziej aktualne. Przykładem może być stan przewidywany dla Z.G. „Piekary” na rok 2010 [150]. Uproszczony schemat przestrzenny tej planowanej sieci został przedstawiony na rysunku 1.6. Powietrze świeże do kopalni dostarczane będzie szybami: „Julian I”, „Julian IV” i „Barbara”. W kopalni będą istniały trzy rejony wydobywcze: „Piekary”, „Brzeziny” i „Rozbark”. Ze względu na rozpatrywane zagadnienie, najbardziej interesujące jest przewietrzanie rejonu „Rozbark”. Powietrze świeże sprowadzane będzie na poziom 660 m szybem „Barbara”. Przewiduje się, że powietrze zużyte z tego rejonu kierowane będzie do dwóch szybów wydechowych: „Julian II” i „Dołki” (rys. 1.8.). W sieci wentylacyjnej w strefie zużytej będą więc występowały „międzysystemowe” prądy zależne.

Połączone kopanie „Rydułtowy” i „Anna” tworzą jedną kopalnię zspoloną, która dysponuje obecnie 7 szybami wdechowymi (w tym jeden jest przewidziany do likwidacji) oraz 5 szybami wydechowymi (także jeden przewidziany do likwidacji). Od kilku miesięcy obydwie Ruchy posiadają połączenie wentylacyjne w strefie prądów zużytych. W latach 2007 ÷ 2010 przewiduje się bieg 29 ścian. Przeprowadzona analiza [150] przewietrzania kopalni dla tego okresu wskazuje na dalsze występowanie prądów zależnych w strefie zużytej łączących obydwie Ruchy. W wymienionym okresie liczba ścian z których powietrze zużyte będzie odprowadzane tylko do jednego szybu wydechowego wynosi 17, natomiast liczba ścian z których powietrze zużyte będzie płynęło do dwóch, trzech a nawet do czterech szybów wentylacyjnych wynosi 12. Informacje te wskazują, że problematyka poruszana w pracy jest i będzie istotna dla praktyki kopalnianej.

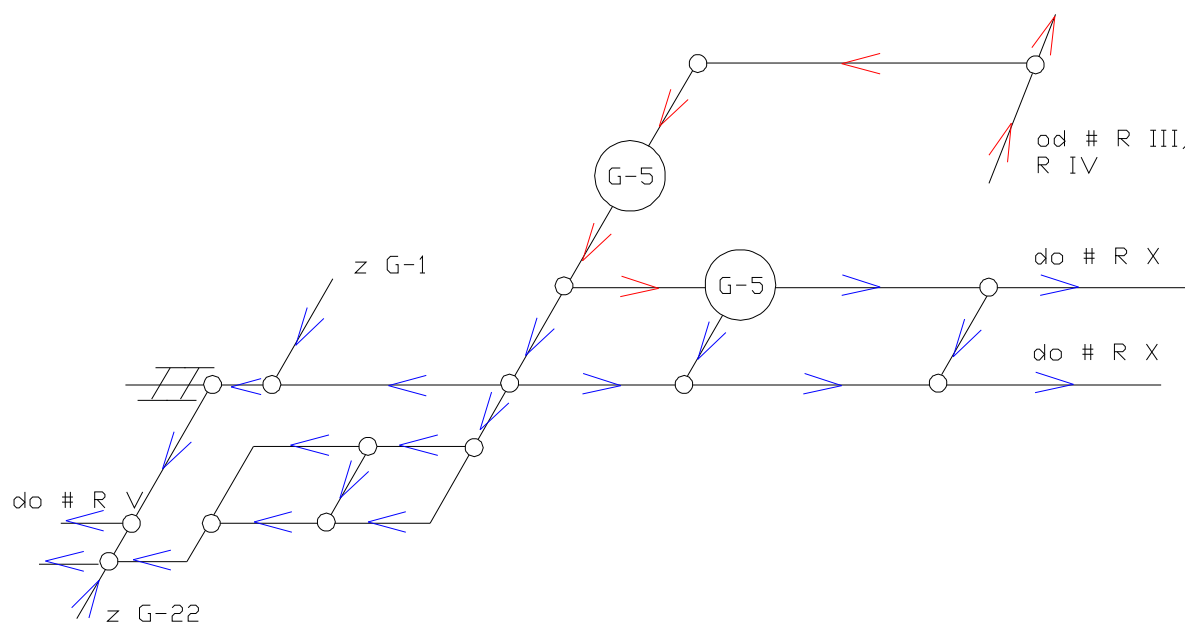
Prądy zależne w strefie zużytej łączące podsieci wentylatorów głównych występują także w polskich kopalniach rudy miedzi. W skład KGHM S.A. wchodzi obecnie trzy zakłady górnicze, to jest: ZG „Lubin”, ZG „Rudna” i ZG „Polkowice-Sieroszowice”. Długość czynnych wyrobisk wynosi obecnie około 1700 kilometrów. Powoduje to konieczność dostarczania i odprowadzania znacznej ilości powietrza. Obecnie w zakładach górniczych KGHM istnieje 17 szybów wdechowych oraz 12 szybów wydechowych [150]. Sumaryczna ilość powietrza płynącego przez wentylatory główne przekracza $400\,000\text{ m}^3/\text{min}$. Połączenia podziemne zakładów górniczych oraz znaczna liczba szybów wydechowych wpływają na występowanie wspomnianych prądów.



Rys. 1.7. Fragment schematu przestrzennego kopalni miedzi „Lubin”

W ZG „Lubin” podsieci dwóch szybów wydechowych L IV i L V praktycznie tworzą jedną podsieć Lubin Zachód (rys. 1.7.). W strefie powietrza zużytego, na przykład na podszybiach, występuje duża liczba połączeń. Ilości powietrza przepływające przez poszczególne stacje wentylatorowe zabudowane przy wymienionych szybach nie są jednakowe. Odpowiednio wynoszą: $24000 \text{ m}^3/\text{min}$ dla wentylatora przy szybie L IV oraz $35595 \text{ m}^3/\text{min}$ dla wentylatora przy szybie L V. Nierówny rozdział powietrza wynika z różnych średnic szybów, które z kolei wpływają na opory tych wyrobisk oraz z typów zastosowanych wentylatorów. Fragment schematu przestrzennego ZG „Lubin” szyby L IV i L V został pokazany na rys 1.7.

We wspomnianych sieciach kopalń LGOM występują także przypadki rozdzielania się zużytych rejonowych lub grupowych prądów powietrza do dwóch szybów wydechowych. Na przykład powietrze zużyte z rejonu G-5 w ZG „Rudna” jest odprowadzane do dwóch szybów wydechowych R V i R X. Pokazano to na rysunku 1.8, który przedstawia fragment schematu przestrzennego tego rejonu [150]. W sieci wentylacyjnej ZG „Rudna” występują 3 takie przypadki.



Rys. 1.8. Fragment schematu przestrzennego ZG „Rudna” – przewietrzanie oddziału G - 5

2. Przegląd i analiza metod obliczeń naturalnego i wymuszonego rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej

2.1. Rodzaje obliczeń rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej

Prowadzenie bezpiecznych robót górniczych wymaga zapewnienia trwałego i mało podatnego na zmiany przepływu powietrza w kopalni. Badania nad rozplywem powietrza prowadzone są od długiego okresu czasu. Szczególny rozwój teorii kopalnianej sieci wentylacyjnej nastąpił od drugiej połowy XIX wieku i trwa do dnia dzisiejszego [13, 14, 17, 18, 35, 110, 118, 119, 120]. W ciągu lat badań nad tematyką rozplywu powietrza wyodrębniono dwa zagadnienia:

- wyznaczanie naturalnego przepływu powietrza,
- wyznaczanie wymuszonego rozplywu powietrza.

Istnieje również liczny zbiór zagadnień mieszanych, który nie będzie przedstawiony w pracy.

Historycznie wcześniejszym jest problem wyznaczania naturalnego rozplywu powietrza [13, 17, 18, 60, 121], który można zdefiniować w ogólnym przypadku jako wyznaczenie:

- kierunków i strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci,
- parametrów punktu pracy wentylatorów,
- gęstości powietrza przepływającego w bocznicach,
- wielkości depresji naturalnej w bocznicach niepoziomych,
- dysypacji energii w bocznicach,

jeżeli a priori znane są:

- schemat przestrzenny, kanoniczny lub dowolny cyfrowy zapis struktury sieci wentylacyjnej (macierz sąsiedztwa, incydencji węzłowo - bocznicowej, cyklomatyczna),
- opory wszystkich bocznic (wraz z oporami tam w nich występujących),
- charakterystyki wentylatorów które oddziałują na sieć wentylacyjną,

- pole temperatury wirtualnej powietrza,
- wysokości niwelacyjne węzłów,
- ciśnienie statyczne na zrębie szybów wdechowych.

Wymienione dane wejściowe konieczne są do obliczeń, jeżeli dana sieć traktowana jest jako aktywna (występuje w niej wymiana ciepła i masy) [13, 17, 18, 110]. W przypadku, gdy sieć jest siecią pasywną, potrzebne są następujące informacje wejściowe:

- schemat przestrzenny, kanoniczny lub dowolny cyfrowy zapis struktury sieci wentylacyjnej (macierz sąsiedztwa, incydencji),
- opory bocznic,
- charakterystyki wentylatorów

a otrzymanymi wynikami są:

- kierunków i strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci,
- parametrów pracy wentylatorów,
- dysypacji energii w bocznicach

Zakładając, że rozpatrywana sieć pasywna posiada m bocznic, n węzłów oraz l_w wentylatorów niewiadomymi są:

- m wydatków powietrza w bocznicach,
- m dysypacji energii w bocznicach,
- l_w spiętrzeń wentylatorów

Suma niewiadomych wynosi:

$$X = 2m + l_w \quad [2.1.1]$$

Jednocześnie dysponuje się następującą liczbą równań:

- $n-1$ równań dla węzłów wynikających z pierwszego prawa Kirchhoffa,
- $m-n+1$ równań dla węzłów wynikających z drugiego prawa Kirchhoffa,
- m równań charakteryzujących bocznicę,
- l_w równań charakteryzujących wentylatory.

Liczba równań wynikających z drugiego prawa Kirchhoffa można obliczyć opierając się na liczbie cykloematycznej, bazującej na antydrzewie drzewa rozpierającego graf tworzący daną sieć wentylacyjną

$$v = m - n + 1 \quad [2.1.2]$$

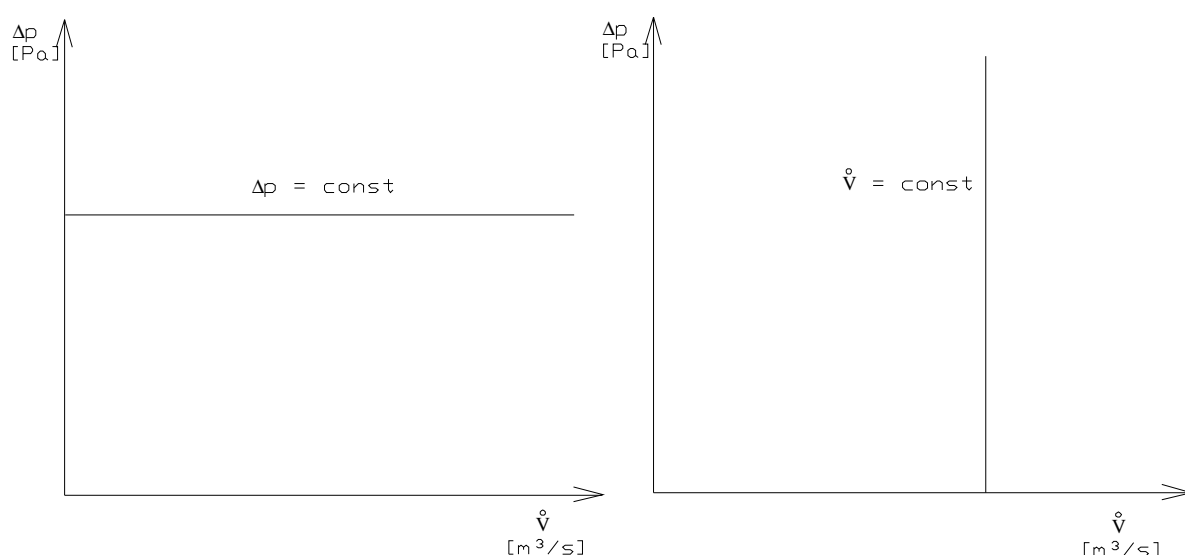
Dla dowolnej spójnej sieci wentylacyjnej można utworzyć v równań niezależnych wynikających z drugiego prawa równowagi (II prawa Kirchhoffa, prawa dla oczek wentylacyjnych)

W sumie liczba równań wynosi:

$$Y = n - 1 + v + m + l_w = 2m + l_w \quad [2.1.3]$$

i jest równa liczbie niewiadomych.

Uzyskany układ równań dla sieci wentylacyjnych jest układem równań nieliniowych. W przypadku sieci normalnych oraz dla sieci prostej przekątnej o idealnych charakterystykach wentylatorów (wentylator o stałym wydatku \dot{V} lub stałym spiętrzeniu Δp przedstawiony został na rys. 2.1.1.) [13, 47, 110] powyższy układ można rozwiązać metodami dokładnymi. Wentylatory o idealnych charakterystykach nie występują w praktyce, lecz mają istotne znaczenie dla obliczeń w wentylacji kopalnianej, pozwalając na rozwiązanie niektórych zagadnień. [74].



Rys. 2.1.1 Idealne charakterystyki wentylatorów

Zagadnienie naturalnego rozplywu ma istotne znaczenie w przypadku powstania stanów awaryjnych spowodowanych pożarami lub tapaniami. W takich sytuacjach może nastąpić bardzo duża zmiana oporu wyrobiska w którym wystąpiło tąpienie, a w przypadku pożaru dodatkowa depresja wywołana źródłem ciepła. Zmiany w rozplywie powietrza spowodowane tymi zjawiskami mogą nie tylko dotyczyć wyrobiska w którym wystąpiły, lecz również mogą mieć znacznie większy obszar i spowodować zagrożenie dla pracowników w odległych rejonach wydobywczych.

Zagrożenia występujące w kopalni, a w szczególności zagrożenia metanowe, pożarowe i cieplne powodują, że ilość przepływającego powietrza jest nieadekwatna do potrzeb wynikających z tych zagrożeń. Dlatego koniecznym staje się utrzymywanie rozplywów wymuszonych, które spełniają założone wymagania. Rozplywy te najczęściej

różnią się od rozpływów naturalnych [13, 14, 16, 20, 21, 30, 40, 115, 116, 117, 119, 127, 128] Żądany rozpływ powietrza uzyskiwany jest za pomocą tam regulacyjnych i/lub wentylatorów pomocniczych oraz dzięki stosowaniu wentylatorów głównych o charakterystykach przechodzących przez żądany punkt pracy układu sieć – wentylator. Do lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku lokalizacja oraz nastawy regulatorów były dobierane na podstawie doświadczenia pracowników służb wentylacji kopalń. Dopiero wykorzystanie ETO pozwoliło na analizowanie uzyskanych na emc wielu wariantów rozplywu powietrza, a następnie na podjęcie decyzji o wyborze szczególnego wariantu [7, 8, 42, 59, 84].

Ogólnie zagadnienie wyznaczania rozplywu wymuszonego powietrza polega na znalezieniu:

- kierunków i strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci,
- potrzebnych spiętrzeń wentylatorów,
- lokalizacji i oporów tam regulacyjnych oraz/lub lokalizacji i spiętrzeń wentylatorów pomocniczych,
- dysypacji energii w bocznicach i tamach regulacyjnych

oraz w przypadku sieci aktywnych:

- gęstości powietrza przepływającego w bocznicy,
- wielkości depresji naturalnej w bocznicach niepoziomych,

jeżeli a priori znane są:

- schemat przestrzenny, kanoniczny lub dowolny cyfrowy zapis struktury sieci wentylacyjnej (macierz sąsiedztwa, incydencji),
- opory bocznic,
- kierunki i strumienie objętości powietrza w niektórych bocznicach sieci (odbiorach powietrza)

oraz w przypadku sieci aktywnych:

- pola temperatury wirtualnej powietrza,
- wysokości niwelacyjne węzłów.

Zakładając, że rozpatrywana sieć posiada m bocznic, n węzłów, l_w wentylatorów oraz l_{pc} odbiorów niewiadomymi są:

- $m - l_{pc}$ wydatków powietrza w bocznicach,
- m dysypacji energii w bocznicach,
- l_w wymaganych spiętrzeń wentylatorów głównych
- l_{tr} wymaganych oporów tam regulacyjnych lub spiętrzeń wentylatorów pomocniczych

Suma niewiadomych wynosi:

$$X = 2m - l_{pc} + l_w + l_{tr} \quad [2.1.4]$$

Jednocześnie dysponuje się następującą liczbą równań:

- $n-1$ równań dla węzłów wynikających z pierwszego prawa Kirchhoffa,
- $v = m - n + 1$ równań dla węzłów wynikających z drugiego prawa Kirchhoffa,
- m równań charakteryzujących bocznicę,

W sumie liczba równań wynosi:

$$Y = n - 1 + v + m = 2m \quad [2.1.5]$$

Liczba niewiadomych przewyższa liczbę równań, powstały układ równań posiada nieskończenie wiele rozwiązań, spełniających ograniczenia wynikające z warunków rozplywu wymuszonego. W niniejszej pracy przyjęto, że rozplyw wymuszony będzie uzyskiwany za pomocą tam regulacyjnych, czyli na drodze tzw. regulacji dodatniej [115]. Tamy regulacyjne będą lokalizowane w rejonowych prądach powietrza. Powyższe założenia pozwalają na stwierdzenie następującej zależności

$$l_{tr} = l_{pc} \quad [2.1.6]$$

Po uwzględnieniu zależności 2.1.6 równanie 2.1.4 można zapisać

$$X = 2m + l_w \quad [2.1.7]$$

Z równania 2.1.7 wynika, że nawet dla sieci wentylacyjnej z jednym wentylatorem głównym, liczba niewiadomych jest większa niż liczba uzyskanych równań. Dlatego konieczne jest wykorzystanie dodatkowych warunków. Warunkami tymi może być przyjęcie zerowego oporu tamy regulacyjnej na drodze krytycznej [115, 119] i założenie wydatku przepływającego przez wentylator główny w sieciach wentylacyjnych o liczbie tych wentylatorów większej niż jeden.

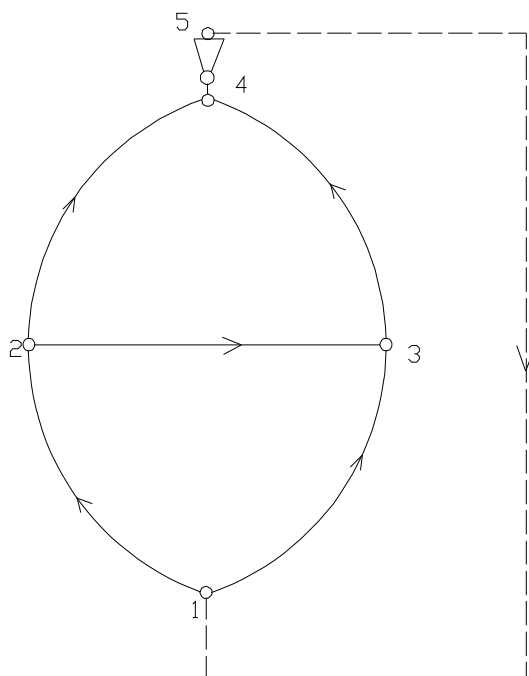
2.2. Metody obliczeń naturalnego rozplywu powietrza

Naturalny rozplyw powietrza w kopalni uzyskiwany jest za pomocą wentylatorów głównych lub poprzez wentylacje naturalną bez zastosowanie tam regulacyjnych i wentylatorów pomocniczych [13, 17, 18, 110, 119]. Znajomość rozplywu naturalnego jest istotna w przypadku gwałtownych zmian zachodzących w sieci np. wymiana wentylatora lub zmiana jego charakterystyki, powstanie pożaru podziemnego lub znaczna zmiana oporu bocznicy powstała z powodu tąpnięcia.

Dla takiego rodzaju sieci rozwiązanie można uzyskać metodą graficzną, polegającą na kolejnym sumowaniu połączeń szeregowych i równoległych, aż do znalezienia krzywej obrazującej opór zastępczy całej sieci. Znana jest również tablica schodkowa zaproponowana przez W. Budryka [13], w której dzięki wykorzystaniu otworu równoznacznego uzyskuje się na drodze kolejnych przekształceń opór zastępczy sieci, a następnie znajduje się punkt pracy wentylator – sieć. Z tablicą schodkową powiązane jest pojęcie klasy bocznicy. Prąd całkowity powietrza zaliczany jest do klasy 0, natomiast prądy po kolejnych rozdzieleniach zaliczane są do klasy I, II i dalszych. W sieci wentylacyjnej przedstawionej na rysunku 2.2.1. do klasy 0 zaliczane są bocznicę {1 2, 14 15} do klasy I {2 3, 2 10, 13 14, 9 14} do klasy II {10 11, 11 13, 3 4, 4 9, 3 5, 8 9} zaś do klasy III {5 6, 6 8, 5 7, 7 8} W powyższej metodzie konieczne jest obliczenie oporu zastępczego sieci wentylacyjnej.

26

o niemożności rozwiązania dowolnych równań takich stopni metodami dokładnymi. Dlatego powstał szereg metod przybliżonych, które w skończonej liczbie iteracji prowadzą do rozwiązania postawionego problemu z pewną zadaną dokładnością.



Rys. 2.2.2. Sieć przekątna prosta

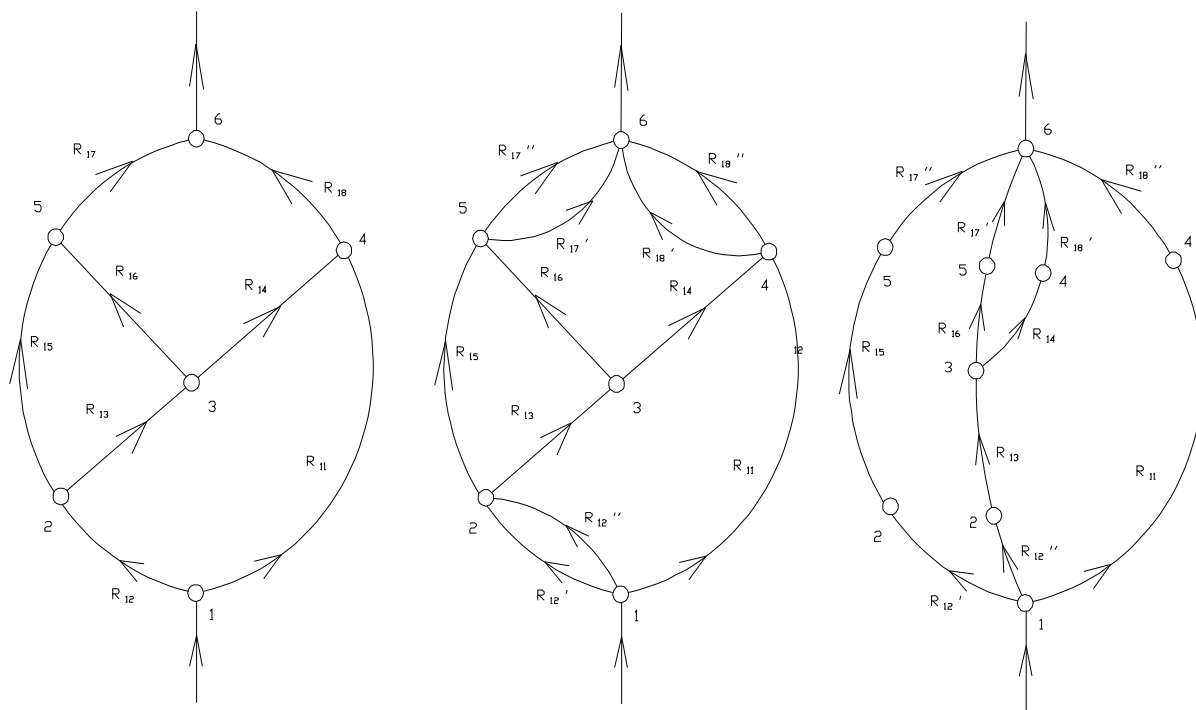
W metodach tych mniej istotne jest znalezienie oporu zastępczego lub otworu równoznacznego sieci, które zresztą w przypadku sieci z większą niż jeden liczbą wentylatorów nie jest stały. Najważniejsze z metod można uszeregować chronologicznie:

- metoda Protodiakonowa,
- metoda S. Barczyka,
- metoda H. Cross'a,
- metoda Aprilego-Sciorty,
- metoda H. Bystronia

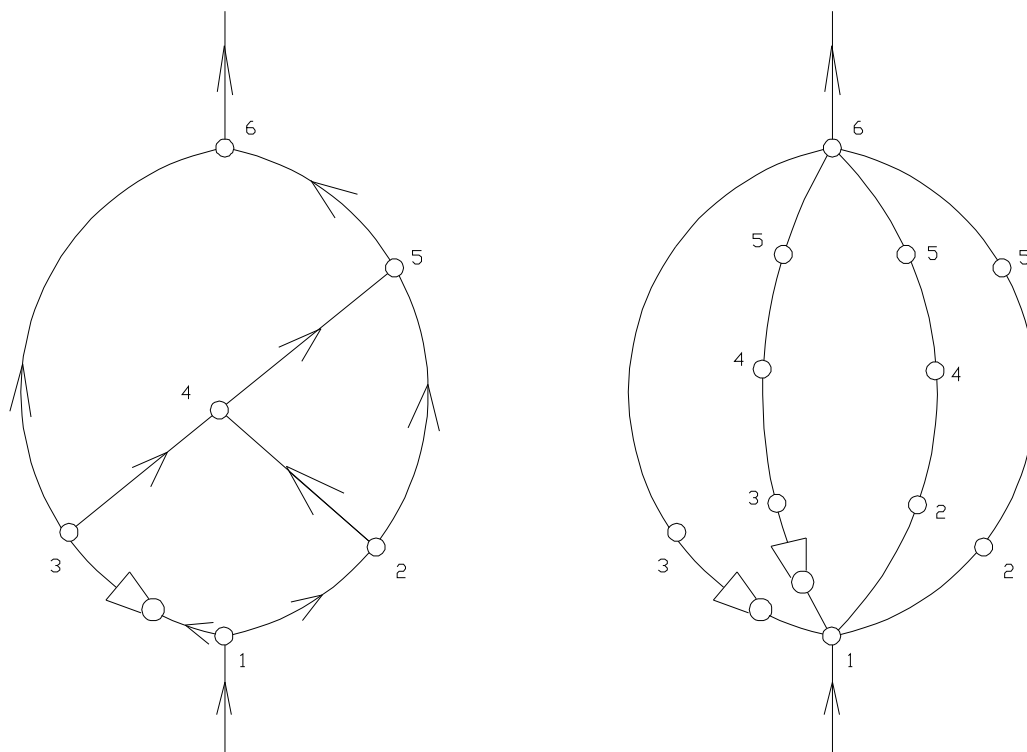
Część wymienionych metod (Protodiakonowa, Aprilego-Sciorty, Bystronia) posługuje się modelem matematycznym, pozostałe dwie korzystają bezpośrednio z nieprzekształconej struktury sieci wentylacyjnej. W metodach Protodiakonowa, Barczyka i Cross'a konieczne jest oszacowanie wydatków powietrza w zerowym przybliżeniu.

Metody Protodiakonowa oraz Aprilego-Sciorty polegają na rozszczepianiu bocznic, na skutek którego następuje przejście na matematyczny model sieci o charakterze normalnym. Na rysunkach 2.2.3. i 2.2.4. przedstawiony został sposób rozszczepiania bocznic

w wymienionych metodach. W metodzie Aprilego-Sciorty opory boczne powstałych po rozszczepieniu bocznicy rozszczepianej są jednakowe, natomiast w metodzie Protodiakonowa uzyskane opory boczne są różne.



Rys. 2.2.3 Rozszczepienie bocznicy według Protodiakonowa



Rys. 2.2.4. Rozszczepienie bocznicy według Aprilego-Sciorty

Ingerowanie w model sieci wentylacyjnej w celu jego uproszczenia może być również uzyskane na wskutek:

- upraszczanie połączeń szeregowych i równoległych,
- zastąpienie bocznica z oporem zastępczym niektórych podsieci,
- zlepianie węzłów, jeżeli bocznica łącząca te węzły posiada bardzo mały opór,
- likwidacja bocznic o bardzo dużym oporze aerodynamicznym.

Stosowanie niektórych z wymienionych uproszczeń może doprowadzić do różnic w wydatkach powietrza obliczanych dla modelu i obliczanych dla sieci. Stosowanie metod „rozszerzeniowych” dla skomplikowanych sieci przekątnych może okazać się czasochłonne.

W metodach S. Barczyka i H. Cross’a [17, 18, 131, 132] model matematyczny nie interweniuje, metody te posługują się sieciami, które nie muszą być upraszczane. Sposób zaproponowany przez S. Barczyka (1935 r.) wykorzystuje metodę Newtona rozwiązywania układów równań nieliniowych. W metodzie wykorzystuje się rozwinięcie funkcji (które muszą być różniczkowalne i ciągłe) według szeregu Taylora ograniczonego do dwóch pierwszych wyrazów. W przybliżeniu zerowym przyjmuje się wydatki powietrza w bocznicach i zgodnie z II prawem Kirchhoffa oblicza się odchyłki (residua) wynikające z niespełnienia tego prawa. Następnie różniczkuje się równania względem wydatku powietrza. Powstały na drodze rozwinięcia układ równań jest układem równań liniowych ze względu na poprawki wydatków powietrza w bocznicach, który można rozwiązać znanymi metodami. Uzyskane poprawki są dodawane do wydatków powietrza przyjętych w zerowym przybliżeniu. Dalej oblicza się odchyłki dla uzyskanych nowych wydatków. Jeżeli odchyłki są mniejsze niż dopuszczalne, obliczenia są zakańczane, w innym razie konieczne są kolejne przybliżenia wydatków. Powstały układ równań poprawkowych jest skrzyżowany, co powoduje brak samokorygowalności kierunków przepływu powietrza w bocznicach. W takim przypadku należy zmienić przyjęte początkowo kierunki przepływów powietrza i rozpocząć obliczenia od nowa.

W trzydziestych latach opracowana została również metoda H. Cross’a, która zostanie szerzej omówiona. W metodzie tej w przybliżeniu zerowym przyjmuje się dowolne, spełniające I prawo Kirchhoffa, kierunki oraz objętości strumieni $V_i^{(0)}$ przepływającego powietrza w bocznicach. Dla cykli nie zawierających wentylatorów pasywnej sieci wentylacyjnej prawdziwe jest równanie:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot W_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.1]$$

oraz równanie charakteryzujące bocznice:

$$W_i = R_i \cdot V_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.2.2]$$

gdzie:

R_i - opór bocznicy,

V_i - wydatek objętościowy prądu powietrza,

W_i - rozproszenie energii w bocznicy (spadek naporu powietrza),

c_{ki} - element macierzy cyklowo-bocznicowej przyjmujący wartość 1, -1, 0 co wynika z przynależności i-tej bocznicy do niezależnego k-tego cyklu z orientacją odpowiednio zgodną, przeciwną lub gdy i-ta bocznicza nie należy do k-tego cyklu

Uwzględniając równanie [2.2.2] w równaniu [2.2.1] uzyskuje się układ równań kwadratowych:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot (V_i)^2 = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.3]$$

Z powodu przyjęcia wartości $V_i^{(0)}$, która to wartość nie spełnia II prawa równowagi dla sieci wentylacyjnych, można zapisać następujące równanie:

$$V_i = V_i^{(0)} \pm \Delta V_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.2.4]$$

gdzie:

ΔV_i - poprawka wydatku powietrza w cyklu wynikająca z niespełnienia II prawa Kirchhoffa

Uwzględniając poprawkę wydatku powietrza w równaniu [2.2.3] otrzymuje się:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot (V_i^{(0)} \pm \Delta V_i)^2 = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.5]$$

po dokonaniu obliczeń w nawiasie:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot ((V_i^{(0)})^2 \pm 2 \cdot V_i^{(0)} \cdot \Delta V_i + (\Delta V_i)^2) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.6]$$

Wartość $(\Delta V_i)^2$ zostaje pominięta oraz po uzgodnieniu znaków otrzymuje się:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot (V_i^{(0)})^2 + 2 \cdot \Delta V_i \cdot \sum_{i=1}^m R_i \cdot |V_i^{(0)}| \approx 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.7]$$

zaś z powyższego wzoru można uzyskać:

$$\Delta V_i = - \frac{\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot (V_i^{(0)})^2}{2 \cdot \sum_{i=1}^m R_i \cdot |V_i^{(0)}|} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.2.8]$$

Otrzymane poprawki podaje się kombinacji liniowej, a następnie uzyskane wartości poprawek wydatków powietrza dla poszczególnych bocznic dodaje się do wartości oszacowanych z przybliżeń zerowych otrzymując wartość wydatku powietrza w przybliżeniu pierwszym. Następnie sprawdza się, czy dla uzyskanych wartości wydatków powietrza odchyłki wynikające z II prawa Kirchhoffa są mniejsze niż dopuszczalne. Jeżeli zachodzi potrzeba dokonuje się kolejnych przybliżeń wykorzystując we wzorach wartości wydatków powietrza uzyskane w poprzedzających przybliżeniach.

Metoda Cross'a charakteryzuje się samokorygowalnością kierunków przepływu powietrza. Istnieje też wiele modyfikacji przedstawionej metody, wśród nich istnieją wersje pozwalające na obliczanie poprawek wydatków powietrza w bocznicach na podstawie powstałego układu równań liniowych. Metoda Cross'a została zaimplementowana w programach komputerowych (system AERO, pakiet programów WK i PK), które to programy zostały wykorzystane przy obliczeniach dotyczących rozplywu powietrza w wewnętrznych cyklach sieci wentylacyjnej przy narzuconych wydatkach w bocznicach zaliczanych do przekroju całkowitego. Sieć wentylacyjna dla której przeprowadzane są obliczenia traktowana jest w programach jako sieć pasywna (możliwe jest założenie lokalnych źródeł depresji). Powyższa metoda znajduje również zastosowanie, w przypadku stosowania idealnych charakterystyk wentylatorów.

H. Bystron [18], w latach siedemdziesiątych zaproponował sposób rozwiązywania rozplywu naturalnego dla sieci aktywnych. Rekurencyjna metoda modelowa jest możliwa do stosowania również w sieciach pasywnych, przy uwzględnieniu założeń upraszczających. Rozszczepienie bocznic sposobem Aprilego-Sciory zostało zastosowane w zerowym przybliżeniu metody. Następnie obliczane (nie szacowane) są wydatki powietrza w przybliżeniu zerowym, odchyłki dla oczek zewnętrznych i oczek wewnętrznych. W przybliżeniu pierwszym korzysta się z wydatków powietrza otrzymanych w zerowym przybliżeniu. W dalszej kolejności obliczane są poprawki wydatków powietrza, wydatki powietrza w poszczególnych bocznicach, odchyłki wynikające z niespełnienia II prawa Kirchhoffa. Jeżeli istnieje konieczność obliczenia prowadzone są w kolejnych iteracjach, przy przyjmowaniu wydatków powietrza uzyskanych z poprzedzającej iteracji. Dla sieci aktywnej obliczane są dodatkowo w każdym z przybliżeń: gęstości powietrza, depresje naturalne oraz mechaniczne kumulacje energii.

Do metod obliczania rozplywu naturalnego można zaliczyć metodę opracowaną przez A. Strumińskiego [118, 119, 121, 127, 128]. Wymieniona metoda pozwala na obliczenie naturalnego rozplywu powietrza w wewnętrznych oczkach sieci wentylacyjnej bez stosowania

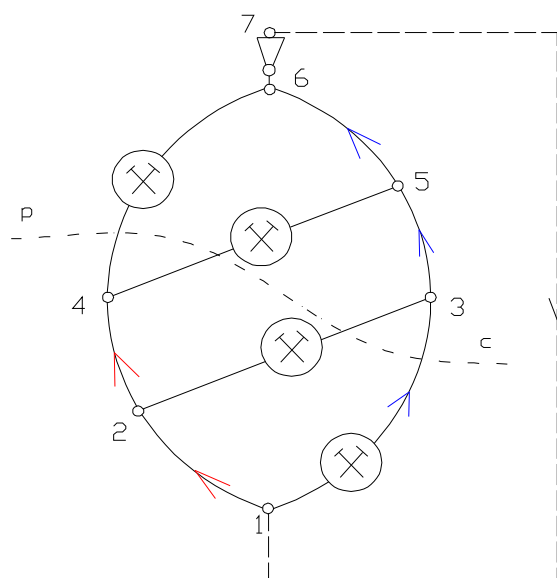
dodatkowych regulatorów w tychże oczkach. Metoda ta zostanie jednak omówiona w części dotyczącej obliczeń rozplywu wymuszonego ze względu na jej uniwersalność.

2.3. Metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza

Ze względu na przeprowadzaną restrukturyzację kopalń, w szczególności biorąc pod uwagę proces łączenia kopalń istotnym problemem jest obliczenie rozplywu wymuszonego powietrza. Koniecznym jest dostosowanie parametrów pracy wentylatora do gwałtownie zmieniających się potrzeb kopalni. Wymuszony rozplyw powietrza w kopalni uzyskiwany jest za pomocą wentylatorów głównych (ze współudziałem wentylacji naturalnej) z zastosowaniem tam regulacyjnych oraz wentylatorów pomocniczych. Rozplyw wymuszony powinien zapewniać bezpieczeństwo i względny komfort pracy, jak również zapobiegać zagrożeniom spotykanym w górnictwie. Poprawę warunków wentylacyjnych można uzyskać, [52, 58] poprzez prawidłowe kierowanie przewietrzaniem kopalni na podstawie istniejącej struktury kopalni.

Wagę postawionego problemu zauważył już Cieczott. W publikacji „Teoria prądów przekątnych” w 1925 r. wprowadził pojęcia regulacji dodatniej i regulacji ujemnej. Spotykane jest również w pracach Cieczotta pojęcia regulacji bezpośredniej – polegającej wyłącznie na zmianie oporów wyrobisk oraz regulacji pośredniej – odbywającej się za pomocą dodatkowych źródeł depresji.

W 1930 roku, A. Sałustowicz [115, 116] opracował sposób obliczeń rozplywu wymuszonego (znanego wtedy pod pojęciem regulacji sieci) dla sieci pasywnych. Wspomniana metoda może być powszechnie stosowana dla sieci bez prądów zależnych, aczkolwiek nie jest już konieczne aby „regulowana” sieć miała charakter normalny. Metoda może być stosowana również dla pewnej grupy sieci przekątnych. Przykład takiej sieci został ukazany na rysunku 2.3.1. W pokazanej sieci przerywaną linią oznaczoną „p-c” pokazany został przekrój całkowity przez odbiory (miejsca pracy), o którym będzie mowa w rozdziale 3.3. Przekroje kanoniczne zostały wprowadzone zostały przez S. Barczyka, pozwalają one na dostrzeganie pewnych zależności w sieciach wentylacyjnych (pozwalają również na dokonanie wydzieleniu w sieci wentylacyjnej stref powietrza świeżego i zużytego).



Rys. 2.3.1 Sieć przekątna bez prądów zależnych

Znajomość wydatków powietrza w bocznicach zaliczanych do przekroju całkowitego (na rys. 2.3.1 odpowiednio 1 3, 2 3, 4 5, 4 6) pozwala, przy skorzystaniu z prawa Kirchhoffa obowiązującego dla węzłów sieci, na ustalanie wydatków powietrza dla każdej bocznicy w rozpatrywanej sieci (przy założeniu braku prądów zależnych). Istnienie połączeń równoległych w strefie powietrza świeżego lub zużytego nie powinno w znaczący sposób utrudniać obliczeń, gdyż jak wspomniano wcześniej, istnieje możliwość zastosowania np. tabeli schodkowej do znalezienia rozplywu powietrza dla tak połączonych bocznic.

Jeżeli liczba bocznic (odbiorów powietrza) zaliczana do przekroju całkowitego jest równa liczbie cykloamatycznej sieci (ze wzoru 2.1.2)

$$v = l_{pc} = m - n + 1 \quad [2.3.1]$$

to przy wykorzystaniu wyłącznie I prawa Kirchhoffa możliwym jest obliczenie wszystkich wydatków powietrza. Dla sieci nie zawierających prądów zależnych równość określona wzorem [2.3.1] jest prawdziwa. A. Sałustowicz przedstawił w swoich pracach następujące rodzaje regulacji:

- regulacja dodatnia, w której biorą udział wyłącznie tamy regulacyjne,
- regulacja ujemna odbywająca się za pomocą wentylatorów podziemnych,
- regulacja mieszana, przy zastosowaniu zarówno tam regulacyjnych, jak i wentylatorów pomocniczych

Przy znanych wydatkach powietrza dla każdej bocznicy możliwe jest zapisanie układu równań dla v dróg niezależnych w następującej ogólnej formie dla dowolnego rodzaju przeprowadzanej regulacji:

$$R_{trk} \cdot V_{trk}^2 + \sum_{i \in dk} R_i \cdot V_i^2 = H_g + H_{pk} \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.2]$$

gdzie:

R_{trk} - poszukiwany opór tamy regulacyjnej na k -tej drodze niezależnej,

V_{trk} - wydatek powietrza w wyrobisku, w którym ma być zabudowana tama,

H_g - poszukiwane spiętrzenie wentylatora głównego w danej podsieci,

H_{pk} - poszukiwane spiętrzenie wentylatora pomocniczego na k -tej drodze niezależnej,

d_k - numer drogi niezależnej.

Dla regulacji dodatniej nie są stosowane wentylatory pomocnicze, stąd:

$$H_{pk} = 0 \quad [2.3.3]$$

zaś wzór [2.3.2] przechodzi w:

$$R_{trk} \cdot V_{trk}^2 + \sum_{i \in dk} R_i \cdot V_i^2 = H_g \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.4]$$

Powstały ze wzoru [2.3.4] układ równań jest liniowy. Liczba niewiadomych przekracza liczbę równań o liczbę wentylatorów, dlatego konieczne jest przyjęcie dodatkowych warunków. Dodatkowymi warunkami może być minimalizacja mocy wentylatorów. Ze względu na znajomość wydatku powietrza na wentylatorze, minimalizacja mocy będzie odbywać się będzie poprzez minimalizacje spiętrzeń wentylatorów głównych, a tą z kolei można uzyskać dzięki nie stosowaniu tamy regulacyjnej na drodze najtrudniejszej (drogi w której następuje największy spadek naporu, przy nie uwzględnianiu spadków naporów na tamach regulacyjnych). Spełniając ten warunek spiętrzenie wentylatora można obliczyć ze wzoru:

$$H_g = \sum_{i \in dnt} R_i \cdot V_i^2 \quad [2.3.5]$$

gdzie:

d_{nt} - najtrudniejsze drogi niezależne prowadzące do wentylatorów głównych pracujących na danej podsieci.

Znając spiętrzenia wentylatorów głównego przewietrzania możliwym jest obliczenie oporów tam regulacyjnych na pozostałych drogach ze wzoru:

$$R_{trk} = \frac{H_g - \sum_{i \in dk} R_i \cdot V_i^2}{V_{trk}^2} \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.6]$$

Dla regulacji ujemnej nie są stosowane tamy regulacyjne. Uregulowanie rozplywu powietrza odbywa się tylko za pomocą wentylatorów podziemnych, stąd wzór [2.3.2] można zapisać w następującej postaci:

$$\sum_{i \in dk} R_i \cdot V_i^2 = H_{pk} \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.7]$$

W przypadku regulacji ujemnej liczba niewiadomych odpowiada liczbie równań. Po obliczeniu spiętrzeń wentylatorów podziemnych możliwym jest wybranie najmniejszej wartości ze zbioru uzyskanych spiętrzeń i zastosowanie wentylatora głównego o takiej wartości spiętrzenia. Spiętrzenia wentylatorów pomocniczych są wtedy pomniejszane o tą wartość. Uwaga ta dotyczy sieci wentylacyjnych z jednym wentylatorem głównym. W przypadku ich większej liczby koniecznym staje się odpowiednie przyporządkowanie wentylatorów pomocniczych do właściwego podsystemu wentylatora głównego. Stosowanie regulacji powietrza za pomocą wentylatorów pomocniczych było w Polsce przez długi okres czasu krytykowane, a końcowo zakazane, jednak dzięki postępowi technik obliczeniowych rozplywu powietrza [42, 84] oraz postępowi przy zbieraniu informacji o parametrach powietrza zaczęto dostrzegać możliwość zastosowania wentylatorów pomocniczych zarówno w kopalniach miedzi, jak i w kopalniach węgla. W pracy [14, 6] wskazana jest również możliwość regulacji ujemnej bezpośredniej, uzyskiwanej za pomocą większych przekrojów poprzecznych wyrobisk, stosowania obudów o mniejszym współczynnikach oporu.

W regulacji mieszanej wybierana jest droga przeciętna, która nie może być ani drogą najtrudniejszą, ani drogą najłatwiejszą. Na tej drodze nie stosuje się tamy regulacyjnej, ani wentylatora pomocniczego. W tej podmetodzie stosowane są: wentylatory główne i pomocnicze oraz tamy regulacyjne. Spiętrzenia wentylatorów głównych są obliczane ze wzoru:

$$H_g = \sum_{i \in dp} R_i \cdot V_i^2 \quad [2.3.8]$$

gdzie:

d_p - wybrane przeciętne drogi niezależne prowadzące do wentylatorów głównych pracujących na danej podsieci.

Następnie rozpatrywane są pozostałe drogi. Dla dróg o spadku naporu mniejszym (łatwiejszych niż przeciętna) niż na drodze przeciętnej stosuje się tamy regulacyjne. Opory tam regulacyjnych obliczane są ze wzoru [2.3.6]. Dla dróg o spadku naporu większym (trudniejszych niż przeciętna) niż na drodze przeciętnej stawia się wentylatory pomocnicze o spiętrzeniu obliczanym ze wzoru:

$$H_{pk} = \sum_{i \in dk} R_i \cdot V_i^2 - H_g \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.9]$$

Metoda Sałustowicza jest prosta w sensie rachunkowym, niestety nie znajduje zastosowania w sieciach z prądami zależnymi. Sałustowicz rozwiązuje ten problem poprzez narzucenie dodatkowych warunków, polegających na zadaniu rozdziału wydatków powietrza w strefie świeżego i zużytego powietrza, które doprowadzają do układu równań liniowych. Narzucone warunki zmuszają do sytuowania większej ilości tam regulacyjnych lub wentylatorów pomocniczych. Metoda uwzględnia konieczność optymalizacji mocy użytecznej wentylatorów.

Dla sieci pasywnych z prądami zależnymi połączone wykorzystanie metod A. Sałustowicza i H. Cross'a pozwala na wyznaczenie rozplywu powietrza w całej sieci (zadane wydatki w bocznicach odbioru mogą być wstępnie traktowane jako wentylatory o idealnej charakterystyce pionowej). Występowanie prądów zależnych w strefach powietrza świeżego i zużytego powoduje powstanie v-l_{pc} cykli wewnętrznych w wymienionych strefach. Korzystając z metody obliczeniowej Cross'a (rozdział 2.2) możliwe staje się obliczenie wydatków powietrza w bocznicach należących do tych cykli. Po wyznaczeniu wydatków powietrza w każdej z bocznic, dalsze postępowanie może być zgodne z metodą A. Sałustowicza.

H. Bystroń w 1955 r. [14] zaproponował metodę służącą do obliczeń rozplywu wymuszonego w pasywnych sieciach wentylacyjnych. Metoda pozwala na obliczenie rozplywu wymuszonego powietrza w sieciach zawierających prądy zależne. W pracy wspomniano o możliwości regulacji naturalnej tj. bez zastosowania tam regulacyjnych i wentylatorów pomocniczych, a przy stosowaniu prądów zależnych. Podana metoda ma charakter iteracyjny, do jej wykorzystania nie jest konieczne stosowanie modeli matematycznych.

W 1968 r. H. Bystroń [16] przedstawił metodę regulacji skrępowanej rozplywu powietrza. Metoda może być wykorzystana dla sieci pasywnych bez prądów zależnych, w których to sieciach wydatki powietrza w bocznicach odbioru determinują rozplyw powietrza w całej kopalni. Parametrami obliczanymi w metodzie są opory bocznic, wykorzystywany jest znany stosunek niezależności prądów rejonowych i grupowych powietrza ujęty przez wzór:

$$m_i = \frac{W_i}{\sum_{i \in l} W_i} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad [2.3.10]$$

Metoda ta prowadzi do układu równań liniowych rozwiązywalnego w sposób dokładny. Wyniki uzyskane powyższą metodą mogą doprowadzać w pewnych przypadkach, zmiany oporów dla każdej bocznicy, co w praktyce okazuje się nie zawsze możliwe.

W GIG w 1971 r. została opracowana iteracyjna metoda projektowania rozpływów wymuszonych powietrza dla sieci aktywnych [20], która przy przyjęciu założeń upraszczających może być też stosowana w pasywnych sieciach wentylacyjnych. W metodzie konieczna jest znajomość a priori kierunków i wydatków powietrza w bocznicach sieci, wysokości niwelacyjnych węzłów, opory umowne bocznic i zaprognozowane pole temperatury wirtualnej. W kolejnych przybliżeniach uzyskiwane są rozproszenia energii, depresje naturalne, gęstości powietrza oraz nastawy regulatorów i parametry pracy wentylatorów głównych. Metoda powyższa zastosowana do sieci pasywnych odpowiada metodzie A. Sałustowicza wraz z zaproponowanym podziałem na regulację dodatnią, ujemną i mieszaną.

W 1974 r. [30] powstała metoda projektowania wymuszonych rozpływów powietrza dla pasywnych sieci wentylacyjnych z prądami zależnymi. W metodzie ustala się dla prądów zależnych konieczne dysypacje mocy. Prądy powietrza zostały sklasyfikowane na mocne, średnie, słabe i bardzo słabe. Klasyfikacja prądów przedstawia się następująco:

- prądy mocne – dysypacja mocy >1200 W,
- prądy średnie – dysypacja mocy $600 - 1200$ W,
- prądy słabe – dysypacja mocy $50 - 600$ W,
- prądy bardzo słabe – dysypacja mocy <50 W

Na podstawie założonych wstępnie dysypacji mocy w bocznicach można obliczyć wydatek powietrza ze wzoru:

$$V_i = \sqrt[3]{\frac{N_i}{R_i}} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad [2.3.11]$$

gdzie:

N_i – przyjęta dysypacja mocy w bocznicach.

Stosowanie prądów zależnych o wysokich dysypacjach mocy powinno według autora zwiększać bezpieczeństwo sieci wentylacyjnej.

Znając ilość powietrza w rejonach i dla prądów zależnych, można korzystając z prawa Kirchhoffa dla węzłów wyznaczyć wydatki powietrza dla każdej bocznicy. Następnie obliczane są spadki naporu dla każdego z niezależnych oczek wewnętrznych i określone są miejsca regulatorów i ostatecznie ich nastawy. Należy zauważyć, iż żądany rozpływ

powietrza można uzyskać przy różnej lokalizacji regulatorów. Równania biorące udział w metodzie są liniowe.

Metoda obliczeń naturalno-wymuszonego rozptywu powietrza w sieci zaproponowana przez A. Strumińskiego pozwala na wyznaczenie kierunków i wydatków powietrza w oczkach wewnętrznych sieci, przy narzuconych warunkach [118, 119, 120, 121, 127, 128]. Narzuconymi warunkami mogą być parametry wentylatorów albo zadane wydatki w bocznicach odbioru. Metoda ta wykazuje uniwersalność, można ją zastosować zarówno do obliczeń naturalnego, jak i wymuszonego rozptywu. Dopuszczalne jest występowanie bocznic w oczkach wewnętrznych dla których nie jest możliwe wyznaczenie wydatków powietrza na podstawie tylko zadanych wydatków w odbiorach oraz I prawa Kirchhoffa. Oznacza to, że podany sposób może być wykorzystany w sieciach wentylacyjnych z prądami zależnymi, zarówno w strefie powietrza świeżego jak i zużytego. Uzyskany rozptyw powietrza może być traktowany jako rozptyw naturalny (powstały bez zastosowania regulatorów) w niektórych oczkach wewnętrznych.

Sposób wyznaczania wspomnianego rozptywu jest następujący. W przybliżeniu zerowym aproksymuje się funkcje charakteryzujące bocznicę [2.2.2] funkcjami liniowymi o współczynniku kątowym k_i :

$$\begin{aligned} W_i &= R_i \mathcal{V}_i^2 & i &= 1, 2, \dots, m \\ W_i^{(0)} &= k_i \cdot V_i^{(0)} & i &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad [2.3.12]$$

gdzie:

$W_i^{(0)}$ – przybliżony spadek naporu dla zerowej iteracji,

$V_i^{(0)}$ – wydatek powietrza w zerowym przybliżeniu,

k_i – współczynnik kątowy dla aproksymacji liniowej

Współczynnikiątowe k_i obliczane są na podstawie wzoru:

$$\sum_{l=1}^L (R_i \cdot V_{il}^2 - k_i \cdot V_{il})^2 = \min \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.3.13]$$

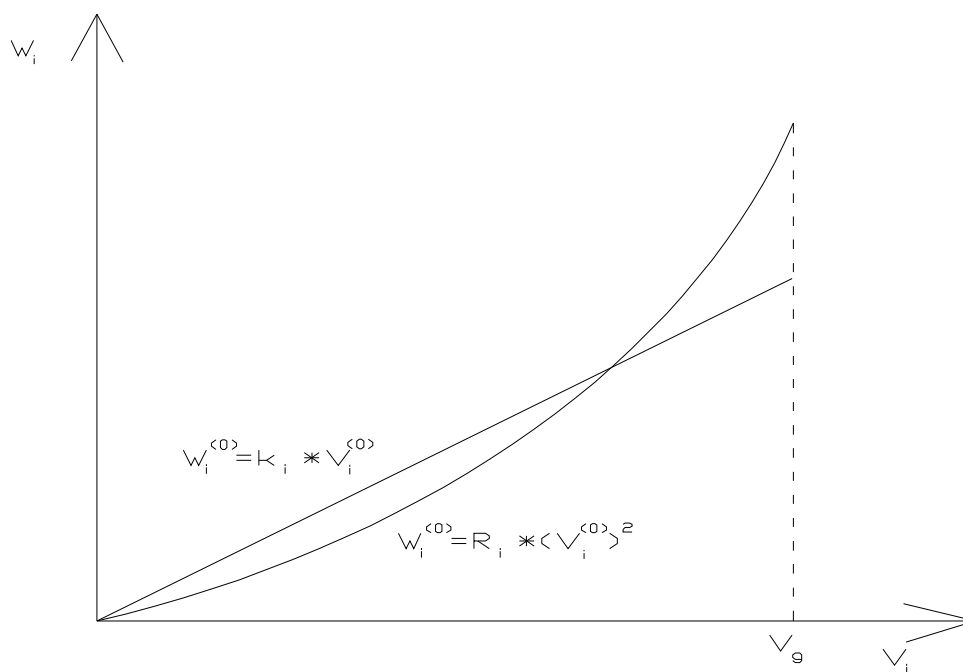
gdzie:

L – górna granica sumowania

Współczynnikiątowe k_i uzyskiwane są dla pewnego przedziału (od 0 do V_g) aproksymowanej funkcji. Funkcja określona wzorem [2.3.13] osiąga minimum gdy jej pierwsza pochodna względem k_i jest równa zero, co można zapisać za pomocą następującego wzoru:

$$2 \cdot k_i \cdot \sum_{l=1}^L V_{il}^2 - 2 \cdot \sum_{l=1}^L R_l \cdot V_{il}^2 \cdot V_{il} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.3.14]$$

Ze wzoru [2.3.14] można wyznaczyć wartości k_i dla każdej z aproksymowanych funkcji opisujących charakter bocznicy. Aproksymacja została graficznie przedstawiona na rysunku 2.3.2.



Rys. 2.3.2 Aproksymacja funkcji spadku naporu od wydatku powietrza funkcją liniową

Po wyznaczeniu współczynników kątowych k_i można obliczyć wydatki powietrza w zerowym przybliżeniu na podstawie I prawa Kirchhoffa i wzoru:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot k_i \cdot V_i^{(0)} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.15]$$

Powstały układ równań jest układem liniowym możliwym do rozwiązania znanymi metodami. Następnie wyznacza się odchyłki (residua) wynikające z niespełnienia II prawa Kirchhoffa. Najczęściej odchyłki w przybliżeniu zerowym są większe niż przyjęte odchyłki dopuszczalne. Dlatego zachodzi konieczność dalszych iteracji, aż do uzyskania odchyłek o wartościach mniejszych niż dopuszczalne. W dalszej kolejności stosowane jest rozwinięcie według szeregu Taylora ograniczonego do dwóch wyrażań przy wykorzystaniu zerowych przybliżeń wydatków powietrza, które prowadzi do:

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot V_i^{(0)} \cdot \Delta V_i^{(1)} + \frac{1}{2} \cdot r_k^{(0)} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.16]$$

gdzie:

$\Delta V_i^{(1)}$ – poprawka wydatku powietrza w pierwszym przybliżeniu,

$r_k^{(0)}$ – odchyłka wynikająca z niespełnienia II prawa Kirchhoffa w zerowym przybliżeniu w k-tym oczku wewnętrznym

Obliczane poprawki wydatku powietrza muszą też spełniać I prawo Kirchhoffa dla węzłów sieci:

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \Delta V_i^{(1)} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad [2.3.17]$$

gdzie:

s_{ji} - element macierzy incydencji węzłowo-bocznikowej przyjmujący wartość -1, 1, 0 w zależności od powiązania j-tego węzła z i-tą boczniką

Uzyskany układ równań [2.3.16 i 2.3.17] jest liniowy i pozwala na wyznaczenie poprawek wydatków powietrza w pierwszym przybliżeniu. Dalej wyznacza się wydatki powietrza w pierwszym przybliżeniu na podstawie wzoru:

$$V_i^{(1)} = V_i^{(0)} + \Delta V_i^{(1)} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.3.18]$$

W dalszej kolejności wyznaczane są odchyłki w pierwszym przybliżeniu wynikające z niespełnienia II prawa Kirchhoffa:

$$r_k^{(1)} = \sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot R_i \cdot (V_i^{(1)})^2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [2.3.19]$$

Jeżeli zachodzi konieczność wykonuje się dalsze przybliżenia, aż do sytuacji gdy:

$$r_k^{(i)} \leq r_{kdop} \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [2.3.20]$$

gdzie:

r_{kdop} – dopuszczalna przyjęta odchyłka w k-tym cyklu, najczęściej przyjmowane są jednakowe odchyłki dla każdego z cykli

W siedemdziesiątych latach ubiegłego wieku metoda została przystosowana do sieci aktywnych. Wykorzystany został rachunek macierzowy, co pozwoliło nie tylko na uproszczenie zapisu, lecz również na lepsze przystosowanie metody w programowaniu komputerowym. Przy obliczeniu rozpyły dla sieci aktywnych także wykorzystano aproksymację funkcją liniową funkcji spadku naporu od wydatku powietrza. W zerowym i kolejnych przybliżeniach uwzględniana jest depresja naturalna oraz rzeczywista gęstość powietrza wynikająca z temperatury wirtualnej. Powyższa metoda może mieć również

zastosowanie do obliczeń rozplywu powietrza przy nieznanym a priori rozkładzie temperatur wirtualnych, którego prognoza zależy od wydatku powietrza przepływającego w bocznicy. W pracy [122] zauważono możliwość wykorzystania odpowiednich przekrojów wyrobisk dla zapewnienia żadanego rozplywu powietrza (regulacja naturalna).

A. Strumiński zauważył w swoich badaniach istotność zagadnienia optymalizacji rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej, zwłaszcza przy uwzględnieniu warunków ruchowych w projektowanej kopalni. W pracy [122, 127] została uwzględniona zarówno regulacja naturalna, jak i za pomocą regulatorów. Przy obu rodzajach regulacji minimalizowane były poprawki zmian naporów (dysypacji lub kumulacji energii). Minimalizacja tych zmian powodowała optymalizację lokalizacji regulatorów oraz minimalizację zmian przekroju wyrobisk w przypadku regulacji naturalnej. Podjęta została także tematyka bezpieczeństwa sieci wentylacyjnej. Jako wskaźnik zagrożenia jakie może wywołać prąd powietrza została przyjęta dysypacja mocy. Podano następujące kryterium bezpieczeństwa dla prądów powietrza w głębinowych kopalniach węgla kamiennego (dla kopalń rud miedzi w miejsce wartości 6000 W i 240 W występują odpowiednio 4800 W i 300W) :

- prądy bardzo mocne dysypacja mocy >6000 W, prądy najbardziej bezpieczne
- prądy mocne – dysypacja mocy 1200 – 6000 W,
- prądy średnie – dysypacja mocy 240 – 1200 W,
- prądy słabe – dysypacja mocy 50 – 240 W,
- prądy bardzo słabe – dysypacja mocy <50 W, prądy najmniej bezpieczne.

W procesie optymalizacyjnym ustala się, ze względu na występujące zagrożenia, dysypacje mocy dla prądów powietrza przepływających w bocznicach, a następnie wyznacza się wydatki powietrza na podstawie wzoru [2.3.11].

W pracy [127] podany został sposób optymalizacji rozmieszczenia regulatorów i ich nastawy przy znanych analitycznych charakterystykach wentylatorów głównego przewietrzania.

S. Białas, M. Branny i W. Mikołajczyk przedstawili sposób regulacji sieci wentylacyjnej za pomocą ETO [7]. Dla wszystkich bocznic w sieci wentylacyjnej zostały założone wydatki powietrza w sposób spełniający I prawo Kirchhoffa. Następnie minimalizowane jest kryterium mocy użytej na przewietrzanie kopalni. Dlatego można stwierdzić, że badane zagadnienie należy do minimalizacji funkcji liniowej z ograniczeniami liniowymi.

J. Drenda i G. Niemiec zaproponowali [40] regulację izooporową dla sieci z jednym wentylatorem głównego przewietrzania. Celem regulacji było utrzymywanie stałego oporu zastępczego (otworu równoznacznego) przez dłuższy czas życia kopalni. W przypadku sieci z liczbą wentylatorów większą niż jeden, powyższy sposób regulacji traci swoje zastosowanie z powodu zmiennego oporu zastępczego sieci.

W pracy [63, 64] zwrócono uwagę na sieć wentylacyjną kopalń LGOM, która powoduje konieczność stosowania hierarchicznej struktury regulacji rozplywu powietrza. Możliwa regulacja została rozdzielona na cztery poziomy:

- I poziom regulacji – zasuwy główne w kanałach wentylacyjnych oraz wentylatory w stacjach wentylatorowych,
- II poziom regulacji – wentylatory pomocnicze w grupowych prądach powietrza zużytego,
- III poziom regulacji – tamy regulacyjne umieszczone w niektórych rejonach oraz wentylatory swobodne,
- IV poziom regulacji – wentylatory PWS lub WLE oraz zasłony regulacyjne umieszczone w prądach wewnątrzrejonowych.

Jednym z możliwych do wykorzystania sposobów zapewnienia określonej ilości powietrza w kopalni, szczególnie w okresie jej budowy oraz zmian zachodzących w strukturze kopalni pod wpływem procesu restrukturyzacyjnego jest regulacja wydajności oraz spiętrzenia wentylatora. Regulacja taka może być uzyskiwana na drodze zmiany prędkości obrotowej wentylatora, która może odbywać się w sposób ciągły lub stopniowy [107, 110]. W związku z tym istotnym jest stosowanie w kopalniach wentylatorów o szerokim zakresie pracy stabilnej i ekonomicznej.

W pracy [9, 49] podaje się możliwość wykorzystania wentylatorów swobodnych do regulacji rozplywu powietrza w wyrobiskach udostępniających. Natomiast w publikacjach [107, 108] uwydatniona została możliwość zmniejszenia kosztów finansowych wynikłych z funkcjonowania wentylatorów głównych poprzez obniżenie ich parametrów punktów pracy w dni wolne od pracy. Dla wentylatora o mocy silnika napędowego wynoszącej 930 kW, rząd oszczędności rocznych, przy obniżeniu wydatku powietrza w dni wolne od pracy o 20% wyniósłby 600 000 PLN.

Podsumowując istnieje kilka różnych sposobów obliczeń rozplywu wymuszonego powietrza, niektóre z nich mogą być stosowane tylko do sieci bez prądów zależnych lub wyłącznie do sieci pasywnych. Możliwe jest stosowanie różnych podmetod tj. regulacji dodatniej, mieszanej, ujemnej i naturalnej. Proces optymalizowania rozplywu wymuszonego

może być dokonywany na podstawie różnych wskaźników (bezpieczeństwa, warunków ruchowych, kosztów energii wydanych na przewietrzanie wyrobisk, lokalizacji regulatorów). Często zdarza się, że wymienione wskaźniki są w opozycji wobec siebie i nie mogą być uproszczone do pojedynczego kryterium, stąd badane zagadnienie ma charakter optymalizacji wielokryterialnej, którego rozwiązanie może być skomplikowane, ze względu na nieliniowy charakter ograniczeń i funkcji celu.

Końcowo należy podkreślić konieczność stosowania komputerów przy obydwu rodzajach obliczeń rozplywu, która wynika ze złożoności struktury sieci wentylacyjnej. Rozwój techniki komputerowej, szczególnie w okresie ostatniego dwudziestolecia, a także powszechna dostępność sprzętu i oprogramowania komputerowego, spowodowała możliwość szybkiego rozwiązywania postawionych zagadnień [42].

2.4. Zapotrzebowanie powietrza w odbiorach

W kopalniach głębinowych na skutek prowadzonych robót górniczych, głębokości zalegania złożeń, pracujących urządzeń i maszyn górniczych, zagrożeń naturalnych dochodzi do zmiany parametrów fizycznych oraz chemicznych powietrza w stosunku do warunków atmosferycznych. Wydawałoby się, że koniecznym jest doprowadzenie bardzo dużych ilości powietrza do wyrobisk, lecz ze względu na ekonomikę przewietrzania doprowadzane są jedynie wystarczające jego ilości [52]. Dla pracownika ważne jest, aby ilość powietrza przepływającego w wyrobiskach kopalnianych była wystarczająca do zapewnienia stałości składu chemicznego i temperatury powietrza. Zgodnie z obowiązującymi przepisami górnictwem nie powinno nastąpić przekroczenie stężeń szeregu gazów (CO , CO_2 , CH_4 , NO , H_2S , SO , SO_2) oraz powinno być zapewnione minimalne stężenie O_2 . W przepisach górnictwem określana jest również minimalna i maksymalna prędkość przepływającego przez wyrobisko powietrza oraz dopuszczalna temperatura mierzona termometrem suchym i natężenie chłodzenia powietrza.

Wydatek powietrza w różny sposób oddziałuje na poszczególne zagrożenia naturalne w różnoraki sposób np. znaczny wydatek powietrza jest korzystny ze względu na zagrożenie metanowe, lecz niekorzystny ze względu na zagrożenie pożarowe. Przy znajomości przekroju poprzecznego wyrobiska wydatek powietrza może być obliczany ze wzoru:

$$V = w \cdot A \quad [2.4.1]$$

gdzie:

w – prędkość powietrza,

A – przekrój poprzeczny wyrobiska

Prędkość powietrza może być wyznaczana na podstawie badań naukowych lub obowiązujących przepisów. A. Strumiński sugeruje w pracy [128] przyjmowanie wartości $w = 2$ m/s jako prędkości optymalnej. Aby zapewnić statecznie burzliwy przepływ można obliczyć minimalną prędkość powietrza ze wzoru:

$$w_{\min} = \frac{Re}{64100 \cdot \sqrt{A}} \quad [2.4.2]$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa, dla pokładów niemietanowych można przyjąć $Re = 30000$, zaś dla pokładów metanowych $Re = 60000$.

Prędkość przepływającego powietrza w znaczący sposób wpływa na komfort cieplny odczuwany przez pracownika. Istnieje szereg temperatur zastępczych na które w istotny sposób wpływa prędkość powietrza (wskaźnik WBGT, ATE, zastępcza temperatura francuska, temperatura belgijska, wskaźnik dyskomfortu cieplnego). Na podstawie dopuszczalnych wartości tych temperatur można określić minimalną wartość prędkości powietrza.

Intensywność przewietrzania będąca adekwatna do występującego zagrożenia klimatycznego była przedmiotem wielu prac naukowych. Już w początku XX wieku Hill zaproponował wzory empiryczne dotyczące minimalnej prędkości ze względu na temperaturę i natężenie chłodzenia. Zagadnieniem zajmowali się również w swoich pracach J. Drenda, A. Frycz, J. Knechtel, A. Strumiński, J. Waclawik [39, 52, 53, 70, 144].

Znane są również zależności dotyczące ilości powietrza przypadające na tonę wydobywania oraz na pracownika, mogą być one użyteczne przy wyznaczaniu wydatku powietrza dla zagadnienia obliczenia rozprywu wymuszonego. Zagrożenia metanowe i pożarowe mogą być zwalczane metodami wentylacyjnymi, wśród których istotną rolę pełni intensywność przewietrzania. Ze względu na zagrożenie metanowe można określić ilość powietrza na podstawie wzoru:

$$V = c \cdot \frac{100 \cdot V_{CH_4}}{k_{\max} - k} \quad [2.4.3]$$

gdzie:

c – współczynnik nierównomierności wydzielania się metanu w ścianie, przyjmowany 1,4 – 1,65,

V_{CH_4} – metanowość bezwzględna,

k_{max} – dopuszczalna zawartość metanu na wylocie z wyrobiska,

k – zawartość metanu w prądzie dopływającym do wyrobiska.

Dla komór funkcyjnych (poza komorą ładowania akumulatorów) potrzebny wydatek powietrza obliczany jest przy wykorzystaniu warunku pięciokrotnej wymiany powietrza w komorze w ciągu jednej godziny [2.4.4]

$$V = \frac{5 \cdot V_k}{3600} \quad [2.4.4]$$

gdzie:

V_k – objętość komory.

Dla komory ładowania akumulatorów można wykorzystać wzór:

$$V = 1,53 \cdot 10^{-5} J_{max} \cdot n \quad [2.4.5]$$

gdzie:

J_{max} – maksymalny prąd ładowania,

n – liczba jednocześnie ładowanych ogniw.

Znając ilość potrzebnego powietrza w ścianach, komorach funkcyjnych, przodkach, innych prądach niezależnych, stratach wewnątrzrejonowych i zewnątrzrejonowych oraz stratach zewnętrznych można, na podstawie ich sumy obliczyć ilość powietrza przepływającego przez kanał wentylacyjny. Powyższe zdanie ma rację dla sieci wentylacyjnych zawierających jeden wentylator głównego przewietrzania, jednakże godne uwagi jest, że dla sieci z większą liczbą wentylatorów istnieje możliwość skierowania odpowiedniej ilości powietrza do każdego z wentylatorów za pomocą odpowiedniej lokalizacji i nastawy regulatorów. Ostatnia uwaga jest prawdziwa dla sieci z zużytymi prądami zależnymi pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.

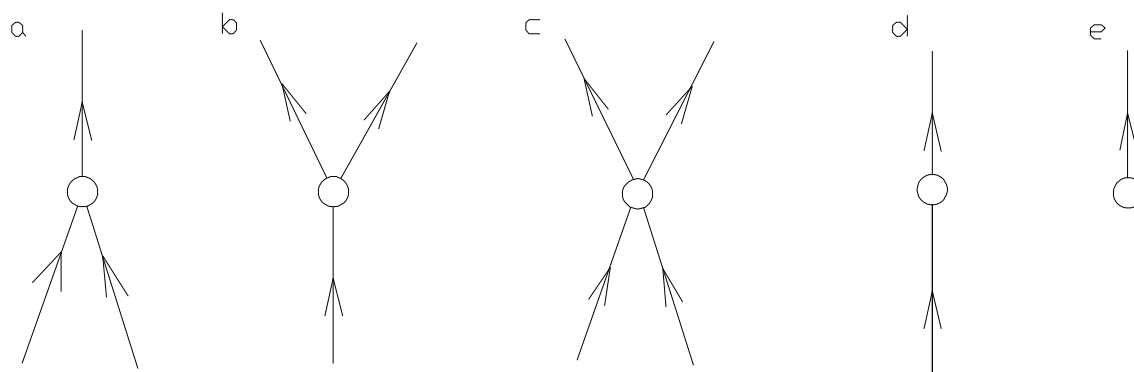
3. Analiza metod badania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej

3.1. Kopalniana sieć wentylacyjna

Wyrobiska górnicze w podziemnych zakładach wydobywających węgiel kamienny tworzą kopalnianą sieć wentylacyjną. Ze względu na różnice w zaleganiu złóż, kopalniane sieci wentylacyjne wykazują się znaczną różnorodnością w ich strukturze. Strukturę sieci wentylacyjnej między innymi determinują: udostępnienie pokładu, lokalizacja szybów, rozcięcie pola eksploatacyjnego [13, 106, 145]. Podstawowymi elementami wchodzącymi w skład sieci wentylacyjnej są węzły, bocznice, tamy wentylacyjne oraz wentylatory. Liczba wymienionych elementów oraz ich wzajemne powiązania wpływają na właściwości sieci wentylacyjnej. Ze względu na intensyfikację i koncentrację wydobywania, które to powodują wzrost zagrożeń występujących w kopalni, przydatna jest znajomość tych właściwości [74]. Szczególnie istotne są cechy struktury sieci wentylacyjnej przy analizie zagrożeń pożarowego, cieplnego i metanowego, gdzie konieczność zwiększonego przewietrzania ścian i przodków spowodowana wzrostem zagrożenia metanowego oraz cieplnego, jest częstą przyczyną wzrostu zagrożenia pożarowego. Podczas analizy zagrożenia pożarowego nie sposób nie zauważyć, że struktura sieci obok miejsca powstania pożaru wpływa w znaczącym stopniu na zasięg strefy zadymienia powstałego przy pożarze. Struktura sieci wpływa na sytuowanie urządzeń zabezpieczających (tamy bezpieczeństwa, zapory główne i pomocnicze) oraz na sposób postępowania przy oddymianiu kopalni. Skomplikowane sieci wentylacyjne, w sensie strukturalnym, o znacznej liczbie bocznic wpływają na koszty utrzymania wyrobisk [145]. Szerzej zagadnienie zostanie omówione w podrozdziale 4.2.

W istniejących kopalniach, szczególnie tych, w których nastąpił proces zespolenia liczba węzłów oraz bocznic często sięga kilkuset [150]. Powstałe struktury sieci są skomplikowane, z tej przyczyny rozwiązanie zagadnień wymienionych w rozdziale dotyczącym metod obliczeniowych rozplywu jest w praktyce bardzo utrudnione bez zastosowania komputerowej techniki obliczeniowej [7, 65, 84].

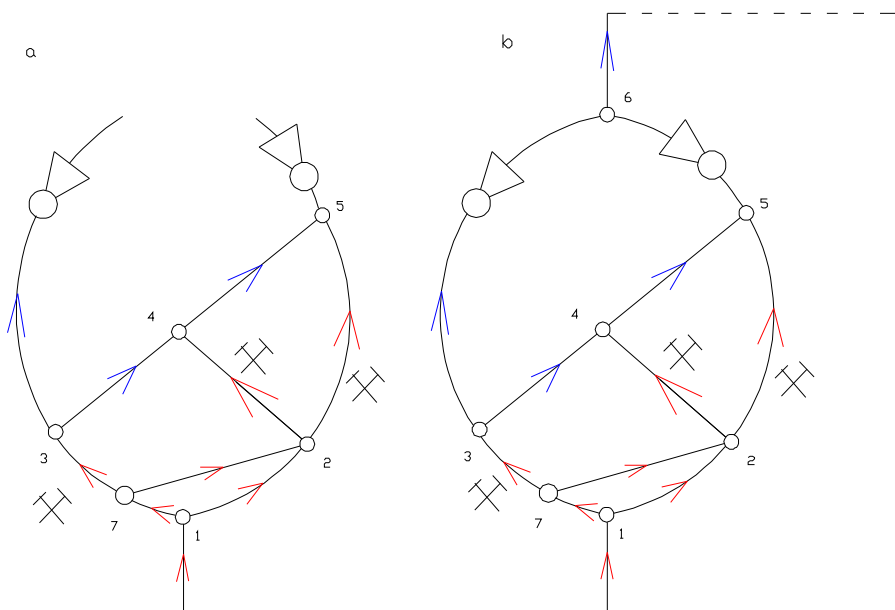
Za węzeł uznawane jest takie miejsce w kopalnianej sieci wentylacyjnej, w którym dochodzi do rozdzielania lub/oraz łączenia się strumienia powietrza. Znane jest również pojęcie półwęzła [74, 146], w którym nie występuje ani łączenie, ani rozdzielanie się strumieni powietrza. Sytuowanie półwęzłów w sieciach wentylacyjnych może okazać się użyteczne przy nagłych zmianach przekroju wyrobiska, jak również w praktyce obliczeniowej przy wyznaczaniu oporów tam regulacyjnych. W tym przypadku w bocznicy i-tej o oporze R sytuowany jest półwęzeł rozdzielający bocznicę i-tą na dwie bocznicę. Opór pierwszej z rozdzielonych bocznic wynosi R , natomiast drugiej bocznicy w której stosowana będzie tama regulacyjna nadaje się wstępnie opór zerowy (uwaga ta dotyczy też wentylatorów pomocniczych). Po wykonaniu obliczeń otrzymany opór drugiej bocznicy będzie oporem tamy regulacyjnej. Możliwe jest również wykorzystywanie półwęzłów przy obliczaniu potrzebnych spiętrzeń wentylatorów głównych w zagadnieniach rozplywu wymuszonego. Uwagi te są szczególnie istotne przy wykorzystywaniu programów komputerowych obliczających rozplywy powietrza. W teorii grafów [146] półwęzłem zostaje wierzchołek o stopniu równym 2, natomiast węzłem wierzchołek o stopniu 3 lub wyższym. Wprowadzenie półwęzłów do struktury powoduje zarówno wzrost liczby bocznic m o jeden, jak i wzrost liczby węzłów n o jeden, więc nie wpływa na zmianę liczby cyklomatycznej sieci. Rodzaje węzłów zostały przedstawione na rysunku 3.1.1.



Rys. 3.1.1 Rodzaje węzłów w kopalnianej sieci wentylacyjnej

- a. węzeł typu łączenie
- b. węzeł typu rozdzielanie
- c. węzeł typu mieszanie
- d. półwęzeł
- e. węzeł wiszący

W praktyce kopalnianej [74, 79, 91] spotykane jest pojęcie węzła wlotowego do sieci w_{ps} oraz węzła wylotowego z sieci w_{ks} . W przypadku kopalń posiadających kilka szybów wdechowych, realizowane jest to poprzez połączenie węzłów początkowych szybów wdechowych z węzłem wlotowym do sieci za pomocą fikcyjnych bocznicy, którym zostaje nadany zerowy opór. Analogiczną procedurę można stosować dla węzła wylotowego z sieci. Sieć wentylacyjna, w której węzeł wlotowy w_{ps} i wylotowy w_{ks} połączone są boczniką reprezentującą atmosferę (o zerowym oporze) nazywa się siecią zamkniętą. W praktyce górniczej spotykane jest również zlepianie węzła wlotowego do sieci z węzłem wylotowym z sieci. Przykład schematu kanonicznego otwartego z dwoma szybami wydechowymi oraz schematu zamkniętego został przedstawiony na rysunku 3.1.2.



Rys. 3.1.2 Schemat kanoniczny sieci otwartej (a) i sieci zamkniętej z dodanym fikcyjnym węzłem 6 (b)

Twórcami schematu kanonicznego otwartego jest H. Czecht [35, 36, 37], zaś schematu zamkniętego W. Budryk. Schemat kanoniczny (obok schematu przestrzennego, potencjalnego, mocy) jest jednym ze sposobów przedstawienia sieci wentylacyjnej, obecnie często zaniechanym w stosowaniu, ze względu na czasochłonność kreślenia, konieczność odwikłania schematu, przy braku informacji o ewentualnej planarności sieci [130]. Prawidłowo narysowany schemat kanoniczny może usprawniać analizowanie sieci wentylacyjnej, a w szczególności ułatwiać wydzielanie podsieci oraz poszukiwanie bocznicy z prądami przekątnymi, prądami zależnymi.

Poprzez bocznice wentylacyjną rozumie się wyrobisko lub ciąg wyrobisk połączonych szeregowo łączących węzły. Bocznice wentylacyjną charakteryzują parametry geometryczne: długość, obwód, przekrój oraz wyposażenie i rodzaj obudowy wyrobisk górniczych. Wymienione parametry wpływają na opór bocznicy wentylacyjnej, który może zostać pośrednio zmierzony w przypadku kopalń istniejących lub obliczony w przypadku kopalń projektowanych. Korzystanie z wartości tablicowych oporów może doprowadzić do rozbieżności wyników uzyskanych z obliczeń do wyników zmierzonych na dole kopalni. Właściwym wydaje się być korygowanie wartości oporów wentylacyjnych wyrobisk [8, 128]. Według pracy [8] wartości oporów wyrobisk pomierzonych na dole kopalni są nawet o 20 procent większe niż wartości oporów jakie wynikałyby z nomogramów lub przy wykorzystaniu współczynników oporu.

Prąd powietrza przepływający w bocznicy może posiadać różny charakter:

- prąd wznoszący – od węzła o mniejszej wysokości niwelacyjnej do węzła o większej wysokości niwelacyjnej,
- prąd schodzący – od węzła o większej wysokości niwelacyjnej do węzła o mniejszej wysokości niwelacyjnej,
- prąd normalny – kierunek prądu nie zależy od oporów bocznicy sąsiednich (np. prądy powietrza w bocznicach 1 7, 1 2 na rysunku 3.1.2 są prądami normalnymi),
- prąd przekątny – kierunek zależy od oporów bocznicy sąsiednich (np. prądy powietrza w bocznicach 7 2, 3 4 na rysunku 3.1.2 są prądami przekątnymi). Więcej informacji o prądach przekątnych zostanie przedstawione w podrozdziale 3.4.

W przypadku, gdy bocznice odbioru powietrza (ściany, komory funkcyjne, przodki, inne prądy niezależne) są znane, można wyróżnić prądy powietrza świeżego (przed bocznicami odbioru) i prądy powietrza zużytego (za bocznicami odbioru). Zbiór bocznicy zawierających wyłącznie prądy powietrza świeżego został nazwany strefą powietrza świeżego, na rysunku 3.1.2 zbiór składa się z trzech bocznicy 1 2, 1 7, 7 2. Odpowiednio bocznice 3 4, 4 5, 3 6, 5 6 tworzą strefę powietrza zużytego. Rozdział bocznicy na wyżej wymienione strefy jest istotny przy rozwiązywaniu rozplywu wymuszonego powietrza. Dla tak dokonanego podziału sieci można wyróżnić następujące rodzaje prądów powietrza:

- prąd niezależny – prąd powietrza oddzielający się od prądu powietrza świeżego przewietrzający bocznice odbioru i dołączający do prądu powietrza zużytego (np. prąd powietrza w bocznicach 7 3, 2 4, 2 5 na rys. 3.1.2),

- prąd zależny – prąd powietrza łączący ze sobą dwa różne prądy powietrza świeżego (prąd powietrza w bocznicy 7 2) lub dwa różne prądy powietrza zużytego (prąd powietrza w bocznicy 3 4). Istnienie prądów zależnych utrudnia obliczenia związane z rozplywem wymuszonym powietrza. Należy zauważyć, że nie każdy prąd przekątny jest prądem zależnym (np. prąd w bocznicy 2 4),
- prąd grupowy powietrza świeżego – prąd zasilający co najmniej dwa odbiory (np. prąd powietrza w bocznicy 1 2),
- prąd grupowy powietrza zużytego – prąd powietrza płynący z co najmniej z dwóch bocznic odbioru (np. prąd powietrza w bocznicy 4 5).

Sposoby wyznaczania prądów przekątnych i zależnych zostaną szerzej omówione w rozdziale czwartym oraz w podrozdziale 3.4.

W sieciach aktywnych dodatkowo można dokonać podziału na bocznicę poziomą, w których nie występuje depresja naturalna oraz bocznicę niepoziomą, w których depresja naturalna występuje.

Bocznicę wentylacyjną tworzącą obwód zamknięty składają się na oczko sieci wentylacyjnej. Liczba oczek niezależnych może być określona wzorem [2.1.2]. W literaturze [14, 16, 17] znane są pojęcia oczek wewnętrznych oraz oczek zewnętrznych. Oczkiem zewnętrznym został nazwany każdy cykl niezależny zawierający bocznicę zamykającą (atmosferyczną), np. oczkiem zewnętrznym jest ciąg bocznic 1 2, 2 5, 5 6, 6 1 na rys. 3.1.2b. Natomiast oczkami wewnętrznymi są cykle niezależne nie zawierające bocznic zamykającej, np. oczkiem wewnętrznym jest ciąg bocznic 1 7, 7 2, 2 1 na rys. 3.1.2b. Przy zastosowaniu wspomnianego węzła wlotowego i węzła wylotowego z sieci, liczba niezależnych oczek zewnętrznych jest o jeden większa, niż liczba niezależnych oczek wewnętrznych. Oczka wewnętrzne spełniają kryterium acykliczności tj. nie wszystkie kierunki prądów powietrza w bocznicach zaliczonych do danego oczka są zgodne z przyjętą wstępnie orientacją oczka. Natomiast oczka zewnętrzne zazwyczaj są oczkami cyklicznymi. Uwaga ta dotyczy normalnych stanów przewietrzania, w przypadku wystąpienia pożaru lub przy silnym ciągu naturalnym mogą wystąpić cykliczne oczka wewnętrzne (cyrkulacja powietrza w oczku).

3.2. Prawa równowagi dla kopalnianej sieci wentylacyjnej

Elementy kopalnianej sieci wentylacyjnej wymienione w podrozdziale 3.1 (tj. bocznice i węzły) są ze sobą wzajemnie połączone. Istniejące połączenia pomiędzy węzłami i bocznicami mogą być przedstawiane za pomocą odpowiednich macierzy (sąsiedztwa, incydencji węzłowo – bocznicowej, cyklomatycznej). Sieć wentylacyjna po uwzględnieniu znajomości kierunków przepływu powietrza w bocznicach może być uznana za skończony, spójny graf zorientowany składający się z niepustego zbioru skończonego n wierzchołków oraz z m elementowej rodziny uporządkowanych par elementów wyżej wymienionego zbioru zwanych łukami (krawędziami zorientowanymi), przy czym nie jest wymagane, aby sieć wentylacyjna spełniała warunki grafu prostego, ani grafu planarnego [146]. Niespójność grafu (a tym samym sieci) może zaistnieć w czasie budowy kopalni, jeżeli nie osiągnięto jeszcze pierwszej nitki wentylacyjnej. Dla niektórych zagadnień analizy struktury sieci wentylacyjnej (np. poszukiwanie prądów przekątnych) nie jest konieczny warunek zorientowania grafu, a tym samym nie jest potrzebna znajomość aktualnego rozplywu powietrza.

Dla grafu zorientowanego reprezentującego sieć wentylacyjną można wskazać równania, które muszą zostać spełnione dla ustalonego stanu przepływu powietrza w sieci. W ogólnym przypadku w obliczeniach, w których nie są uwzględniane procesy wymiany ciepła i masy, można skorzystać z następującego uproszczonego układu równań równowagi sieci, w którym występują trzy zasadnicze grupy tych równań:

- charakterystyki elementów:

$$W_i = R_i \cdot V_i^2 \cdot \text{sgn} V_i \quad \text{dla tzw. elementów pasywnych (bocznice z oporem),} \quad [3.2.1]$$

$$H_i = f(V_i) \quad \text{dla tzw. elementów aktywnych,} \quad [3.2.2]$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

- równania dla węzłów sieci (I prawo Kirchhoffa):

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \cdot V_i = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad [3.2.3]$$

- równania dla cykli (II prawo Kirchhoffa):

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot (W_i - H_i) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [3.2.4]$$

gdzie:

R_i – opór bocznicy,

V_i – wydatek objętościowy prądu powietrza,

W_i – rozproszenie energii w bocznicy (spadek naporu powietrza),

H_i – spiętrzenie wentylatora, lokalny ciąg naturalny lub pożarowy,

s_{ji} – element macierzy incydencji węzłowo-bocznikowej przyjmujący wartość:

-1 gdy powietrza w bocznicy i-tej wypływa z węzła j-tego,

1 gdy powietrza z bocznicy i-tej dopływa do węzła j-tego

0 gdy jest brak incydencji pomiędzy boczniką i-tą, a węzłem j-tym

Rząd macierzy s_{ji} wynosi $n-1$

c_{ki} – element macierzy cyklowo-bocznikowej przyjmujący wartość:

-1 gdy orientacja bocznicy i-tej jest niezgodna z przyjętą orientacją k-tego cyklu,

1 gdy orientacja bocznicy i-tej jest zgodna z przyjętą orientacją k-tego cyklu,

0 gdy jest brak incydencji pomiędzy boczniką i-tą, a k-tym cyklem

Rząd macierzy c_{ki} wynosi $v = m-n+1$

Jeżeli elementami aktywnymi są wentylatory, to ich charakterystyki można przedstawić za pomocą wielomianów k-tego stopnia:

$$H_i = \sum_{j=0}^k a_j \cdot V^j \quad [3.2.5]$$

gdzie:

a_j – współczynnik aproksymacyjny charakterystyki wentylatora,

k – stopień wielomianu aproksymacyjnego

Ze względu na koszty przewietrzania kopalni głównymi wentylatorami istotną rolę pełni moc użyteczna, której wartość może być wyznaczana na podstawie wzoru:

$$N_u = \sum_{i=1}^{l_w} H_i \cdot V_i \quad [3.2.6]$$

gdzie:

N_u – sumaryczna moc użyteczna wszystkich wentylatorów głównego przewietrzania,

l_w – liczba wentylatorów pracujących w sieci

W praktyce wielomiany stopnia 3 – 5 charakteryzujące pracę wentylatora w układzie spiętrzeniowo – wydajnościowym są wystarczające dokładne. Znając moc użyteczną wentylatora, jego sprawność oraz sprawność silnika można obliczyć moc elektryczną pobieraną przez silnik z sieci elektrycznej na podstawie wzoru:

$$N_{ei} = \frac{N_{ui}}{h_{wi} \cdot h_{spi}} = \frac{H_i \cdot V_i}{h_{wi} \cdot h_{spi}} \quad [3.2.7]$$

gdzie:

N_e – moc elektryczna pobierana przez silnik wentylatora,

η_{wi} – sprawność i-tego wentylatora w punkcie jego pracy,

η_{spi} – sprawność silnika i-tego wentylatora,

W literaturze [119, 120] spotykane jest przedstawienie układu równań [3.2.1 – 3.2.4], w postaci układu równań macierzowych z jednokolumnowymi wektorami wydatków, wektorami spadków naporu i wektorami zerowymi.

Spełnienie równań równowagi powoduje powstanie równości zwanej bilansem mocy w sieci:

$$\sum_{i=1}^m V_i \cdot W_i = 0 \quad [3.2.8]$$

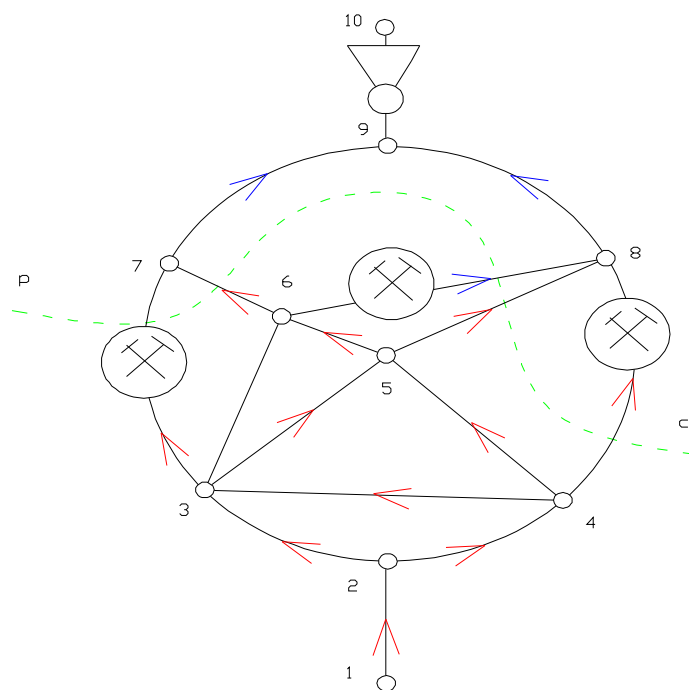
Iloczyn we wzorze [3.2.8] jest mocą traconą (lub zyskiwaną dla bocznic aktywnych) w bocznicie i-tej, przy czym ma on wartość dodatnią dla elementów pasywnych (oporowych), zaś wartość ujemną dla elementów aktywnych (np. wentylatorów).

Na podstawie powyższych wzorów można stwierdzić, że w stanie ustalonym przepływu powietrza bocznicę charakteryzują następujące wielkości: opór, wydatek powietrza, spadek lub przyrost naporu, moc tracona w bocznicie. Na podstawie uzyskanych wielkości możliwym staje się sporządzenie schematów: ilościowego, potencjalnego, mocy, których stosowanie ułatwia rozwiązywanie problemów oraz podejmowanie decyzji w praktyce wentylacji kopalń.

3.3. Przekrój całkowity przez sieć przechodzący przez bocznicę odbiorów powietrza

Wspomniane w podrozdziale 3.1. zagrożenia metanowe, pożarowe oraz ciepłe wymagają stosowania odpowiedniej profilaktyki. Jedną z metod zapobiegania powyższemu zagrożeniu jest wymuszanie odpowiednio intensywnego przewietrzania kopalni, co z kolei wiąże się z dostarczeniem określonej ilości powietrza do ścian, komór funkcyjnych i innych prądów niezależnych. Potrzebna ilość powietrza w bocznicach odbioru może być obliczana ze wzorów przedstawionych w podrozdziale 2.4. lub na podstawie badań naukowych.

Przeprowadzając przekrój przez sieć wentylacyjną zawierający wszystkie bocznicę z odbiorami powietrza, w zdecydowanej większości przypadków można zauważyć, że oprócz wymienionych odbiorów do przekroju zostały zaliczone dodatkowe bocznicę (rys. 3.3.1). Przekrój taki został nazwany przekrojem całkowitym (p-c).



Rys. 3.3.1 Przekrój całkowity (p-c) przez sieć

Na rysunku 3.3.1 ścianami są bocznicie 3 7, 6 8, 4 8, oprócz nich do przekroju całkowitego przez odbiory powietrza zostały dołączone bocznicie 6 7 i 5 8. Powietrze świeże przepływające przez bocznicie 6 7 i 5 8 dołącza do powietrza zużytego ze ścian. Dlatego te dwie bocznicie są stratami. W praktyce straty mogą mieć charakter wewnątrzrejonowy, zewnątrzrejonowy lub zewnętrzny. Straty powietrza mogą mieć charakter rezerwy wentylacyjnej, stanowiącej zabezpieczenie w razie wystąpienia stanów awaryjnych [107]. Należy jednak zauważyć, że wysoka wartość strat powietrza wpływa na zwiększenie spiętrzenia wentylatora oraz wydatku powietrza przepływającego przez wentylatory głównego przewietrzania, co z kolei powoduje wzrost mocy użytecznej wentylatorów, a poprzez to wzrost kosztów przewietrzania.

Charakterystyczną cechą przekroju całkowitego jest liczba bocznic l_{pc} do niego zaliczonych. Dla sieci przedstawionej na rysunku 3.3.1 $l_{pc} = 5$. Przekrój całkowity p-c rozdziela (po usunięciu bocznicy zamykającej, jeżeli korzysta się z sieci zamkniętych) sieć na dwie strefy: powietrza świeżego i powietrza zużytego. Strefy te mogą być traktowane jako podgrafy grafu reprezentującego całą sieć wentylacyjną. Liczba bocznic zaliczanych do strefy świeżej lub zużytej wynosi $m - l_{pc}$, natomiast liczba węzłów zaliczana do tych obydwóch stref nie ulega zmianie i wynosi n . Możliwa do określenia jest liczba cykloematyczna podgrafu strefy świeżej i strefy zużytej na podstawie niżej podanych wzorów. Liczba ta może okazać się użyteczna przy analizowaniu struktury sieci.

Dla sieci otwartej

$$\begin{aligned}
 n_{sw} &= m_{sw} - n_{sw} + 1, \\
 n_{zu} &= m_{zu} - n_{zu} + 1, \\
 \text{przy:} \\
 m_{sw} + m_{zu} &= m - l_{pc}, \\
 n_{sw} + n_{zu} &= n, \\
 \text{i sumując:} \\
 n_{sw} + n_{zu} &= m - l_{pc} - n + 2 = n - l_{pc} + 1
 \end{aligned}
 \tag{3.3.1}$$

Dla sieci zamkniętej:

$$\begin{aligned}
 n_{sw} &= m_{sw} - n_{sw} + 1, \\
 n_{zu} &= m_{zu} - n_{zu} + 1, \\
 \text{przy:} \\
 m_{sw} + m_{zu} &= m - l_{pc} - 1, \\
 n_{sw} + n_{zu} &= n, \\
 \text{i sumując:} \\
 n_{sw} + n_{zu} &= m - l_{pc} - 1 - n + 2 = n - l_{pc}
 \end{aligned}
 \tag{3.3.2}$$

gdzie:

m_{sw}, m_{zu} – liczba bocznic zaliczona odpowiednio do strefy świeżej i strefy zużytej,

n_{sw}, n_{zu} – liczba węzłów zaliczona odpowiednio do strefy świeżej i strefy zużytej,

v_{sw}, v_{zu} – liczba cyklomatyczna odpowiednio podgrafu strefy świeżej i strefy zużytej

W równaniach [3.3.2] bocznicą zamykającą jest uwzględniana w równaniu sumującym liczbę bocznic w obydwu strefach. Bocznicą nie jest zaliczana w równaniach, ani do strefy świeżej, ani do strefy zużytej.

Dla sieci przedstawionej na rysunku 3.3.1 można obliczyć na podstawie równań [3.3.1]:

$$\begin{array}{lll}
 m = 16 & n = 10 & v = 16 - 10 + 1 = 7 \\
 m_{sw} = 8 & n_{sw} = 6 & v_{sw} = 8 - 6 + 1 = 3 \\
 m_{zu} = 3 & n_{zu} = 4 & v_{zu} = 3 - 4 + 1 = 0
 \end{array}$$

po uwzględnieniu $l_{pc} = 5$, zachodzi zgodność ostatniego równania pokazanego w układzie równań [3.3.1]

Po dodaniu bocznic zamykającej (10 1) i wykorzystaniu równań [3.3.2]

$$\begin{array}{lll}
 m = 17 & n = 10 & v = 17 - 10 + 1 = 8 \\
 m_{sw} = 8 & n_{sw} = 6 & v_{sw} = 8 - 6 + 1 = 3 \\
 m_{zu} = 3 & n_{zu} = 4 & v_{zu} = 3 - 4 + 1 = 0
 \end{array}$$

po uwzględnieniu $l_{pc} = 5$, zachodzi zgodność ostatniego równania pokazanego w układzie równań [3.3.2].

Dla przekrojów całkowitych można sformułować odpowiadające im pierwsze prawo Kirchhoffa, a mianowicie: suma wydatków powietrza w bocznicach należących do dowolnego przekroju całkowitego przecinającego sieć jest jednakowa dla każdego przekroju niezależnego. Wykorzystanie prawa może być przydatne w obliczeniach rozplywu wymuszonego. Mianowicie, porównując wydatki w bocznicach odbioru należących do przekroju całkowitego oraz bocznicach zawierających wentylatory główne (które również tworzą przekrój całkowity) uzyskuje się:

$$\sum_{i=1}^{l_{pc}} V_i = \sum_{i=1}^{l_w} V_i \quad [3.3.3]$$

Z powyższego wzoru wynika, że w sieciach z liczbą wentylatorów $l_w = 1$ wydatek powietrza na wentylatorze jest znany, jeżeli znane są wszystkie wydatki w bocznicach odbioru należących do p-c. W sieciach wentylacyjnych z większą liczbą szybów wydechowych wydatek powietrza przepływającego przez wentylator jest znany tylko wtedy, gdy w sieci nie istnieją zużyte prądy zależne pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. Konstruowanie przekrojów całkowitych pozwala na ustalenie dopuszczalnych wydatków powietrza w p – c, dzięki znanej wartości przepustowości bocznic zaliczanych do każdego z tych przekrojów. Przepustowość może być zależna od dopuszczalnych wartości prędkości powietrza.

W pracy [74] stwierdza się przydatność sytuowania bocznic odbiorów na jednakowych wysokościach schematu. Właściwość tą uzyskuje się wykorzystując algorytm podziału zbioru węzłów na warstwy. Algorytm wykorzystuje relację starszeństwa węzłów, która to relacja występuje w acyklicznej sieci zorientowanej, po uprzednim podaniu węzła początkowego w_{ps} i węzła końcowego w_{ks} sieci. Numer warstwy do której należy węzeł w_i jest więc określony poprzez najdłuższą drogę pomiędzy węzłem początkowym sieci w_{ps} , a węzłem rozpatrywanym. Przynależność każdego z węzłów do konkretnej warstwy powoduje wskazanie wysokości węzła na schemacie kanonicznym. Metody nadawania węzłom na schemacie współrzędnej x są aktualnie mało znane, szczególnie dla sieci nieplanarnych. Znajomość obydwu współrzędnych węzłów pozwoliłaby na proste kreślenie schematu na podstawie zapisu macierzowego struktury sieci. Modyfikacja wspomnianego algorytmu powoduje możliwość narysowania poziomego przekroju p-c przez bocznicę odbioru na schemacie kanonicznym co w znaczny sposób ułatwia określenie przynależności

bocznic do przekroju całkowitego oraz zaliczenia bocznic do strefy powietrza świeżego lub zużytego.

Przekrój całkowity, poza wykorzystaniem w obliczeniach rozplywu wymuszonego, pełni istotną rolę w analizie gospodarki powietrzem. Przy analizowaniu zagrożenia powstałego w czasie pożaru podziemnego stosowanie przekroju staje się przydatne. Wykorzystanie przekrojów przez sieć wentylacyjną, zostało wprowadzone w pięćdziesiątych latach XX wieku przez S. Barczyka.

3.4. Analiza charakteru bocznic ze względu na ich przekątność

Obliczenia rozplywu powietrza prowadzone są zazwyczaj dla stanów ustalonych. Należy jednak stwierdzić, że kopalniana sieć wentylacyjna ulega ciągłym zmianom, zarówno dzięki zaplanowanej interwencji człowieka, jak również na skutek działania sił natury lub powstałych awarii. Działalność ludzka może prowadzić do zmian powolnych (wydłużanie się dróg wentylacyjnych, zmiany związane z prowadzeniem wydobywania) lub gwałtownych (uzyskanie nowego przebiecia, prowadzenie robót strzałowych). Zmiany wynikłe z odpowiedzi natury na działalność górniczą mają charakter zazwyczaj nagły (tąpnięcie, wybuch metanu lub pyłu węglowego). Wszystkie wymienione zjawiska dzieją się w sieci wentylacyjnej i na nią oddziałują. Ich efektem mogą być zmiany oporów bocznic, dopływy dodatkowych strumieni objętości powietrza, powstawanie lokalnych źródeł depresji, a nawet powstawanie nowych bocznic wentylacyjnych lub likwidowanie starych.

Istotnym ze względu na bezpieczeństwo pracy jest, aby wspomniane zmiany nie wpływały na kierunki przepływów powietrza w bocznicach. Prądy powietrza powinny z tego powodu charakteryzować się wysoką trwałością, zarówno pod względem ilości przepływającego powietrza, jak i jego kierunku. Wysoki stopień odbiegnięcia struktury od układu szeregowo – równoległego powoduje, że w praktyce częstymi sytuacjami są odwrócenia prądów powietrza jednocześnie w wielu bocznicach na skutek zmian oporów sąsiednich wyrobisk. Należy zauważyć, że nawet dla struktury szeregowo – równoległej możliwe jest odwrócenie prądu powietrza dzięki działaniu wentylatorów pomocniczych lub depresji pożarowych (warunek Koguta). Także przy pracy kilku wentylatorów głównych w sieci trudno zdecydować o jednoznaczności kierunku przepływu powietrza w bocznicy.

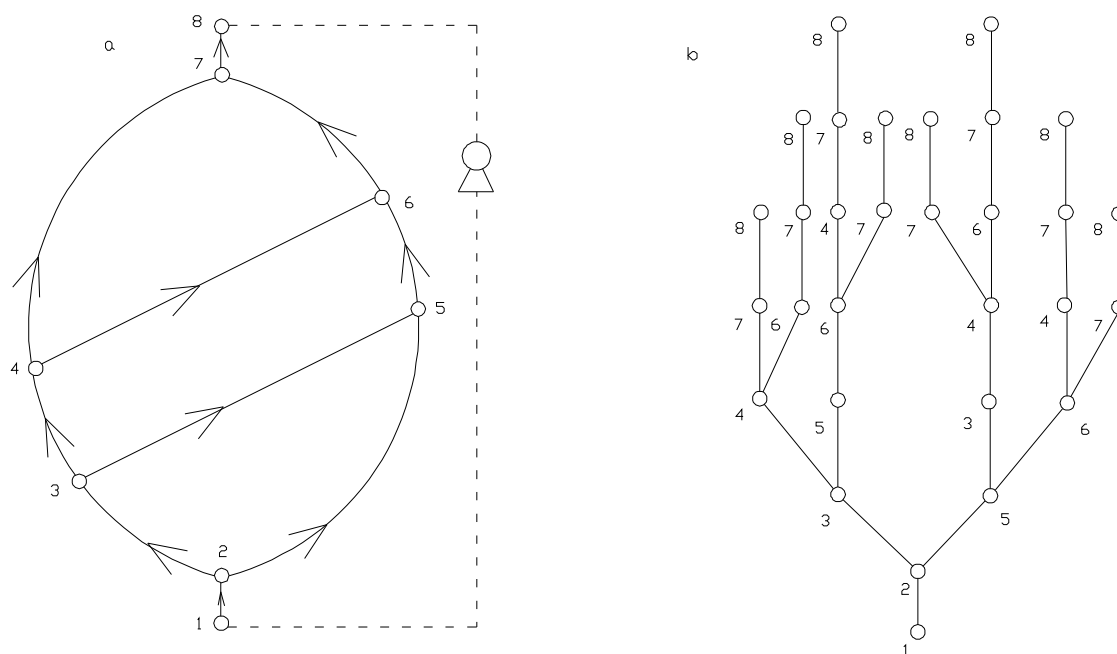
Reasumując trudno jest wskazać bocznice w kopalnianej sieci wentylacyjnej w której prądy powietrza wykazują absolutną trwałość kierunku przy każdym możliwym zaburzeniu, a nawet przy jednoczesnym wystąpieniu wielu zaburzeń.

Jeżeli przyczyną nowego rozplywu powietrza w sieci są wyłącznie zmiany oporów bocznic, to można wtedy rozpatrywać charakter bocznic: normalny lub przekątny. Przynajmniej wtedy (tj. w przypadku wystąpienia tylko zmian oporu bocznic) część prądów powietrza zachowuje swoje kierunki.

Już na początku XX wieku H. Czeczott badał charakter prądów powietrza [35]. Podzielił sieci wentylacyjne na normalne i przekątne. W sieciach normalnych nie występują bocznice przekątne. Połączenia pomiędzy bocznicami mają wyłącznie charakter szeregowy lub równoległy. Stwierdzenie o normalności sieci na podstawie schematu kanonicznego jest wtedy natychmiastowe, również uzyskanie tej informacji na bazie macierzy sąsiedztwa nie powinno sprawiać trudności. W celu znalezienia bocznic połączonych szeregowo wystarczy odszukać w badanej macierzy wszystkie półwęzły [73]. Natomiast przy poszukiwaniu połączeń równoległych wystarczy znaleźć dwie bocznice o jednakowym węźle początkowym w_{pb} i węźle końcowym w_{kb} . Kolejne upraszczanie tych połączeń doprowadza do pojedynczej bocznic. W momencie, gdy brak jest połączeń szeregowych i równoległych, a liczba bocznic jest większa niż 1, oznacza to że badana sieć posiada bocznice o charakterze przekątnym. Sposób postępowania doprowadza więc do stwierdzenia o ewentualnej przekątności sieci, lecz nie informuje o charakterze wszystkich bocznic, jeżeli badana sieć jest przekątna. Ze względu na fakt, iż jedynie niektóre podsieci posiadają charakter normalny, powyższy sposób postępowania ma znikomą przydatność przy analizowaniu rzeczywistych sieci kopalnianych. Koniecznym więc staje się wypracowanie innych metod decydujących o charakterze bocznic.

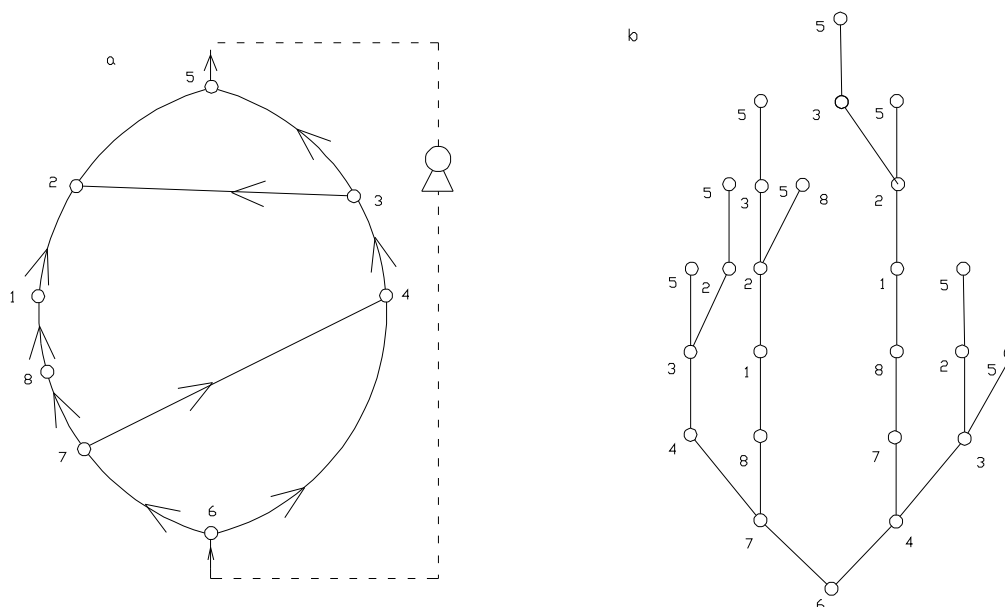
Jedna z powszechnie znanych definicji prądów normalnych i przekątnych została podana w rozdziale 3.1. H. Bystroń wykorzystuje „drogi prawie niezależne”, uzyskując je za pomocą „prawie doskonale szczelnych tam izolacyjnych”. Następnie sprawdza kierunek prądu powietrza dla wszystkich wymienionych dróg, na podstawie których (kierunków) nadaje charakter bocznic. W literaturze [131] podawany jest również sposób rozróżniania bocznic normalnych od przekątnych na podstawie następującej definicji: „element składowy sieci, którego orientację przy ustalonym wlocie x_0 i wylocie x_n sieci można przedstawić na dwa sposoby, posiada charakter przekątny, a gdy na jeden sposób, to posiada charakter normalny”. Zarówno metoda wykorzystująca bezpośrednio pierwszą jak i drugą definicję polega na budowaniu wszystkich łańcuchów przechodzących przez sieć o węźle

początkowym zgodnym z węzłem początkowym sieci w_{ps} oraz o węźle końcowym zgodnym z węzłem końcowym sieci w_{ks} . Jeżeli rozpatrywana bocznicą występuje w zbiorze łańcuchów w dwóch różnych orientacjach to ma charakter przekątny, jeżeli występuje tylko w jednej orientacji to ma charakter normalny. Metoda ta pozwala na stwierdzenie charakteru bocznicy wobec wentylatora głównego przewietrzania w sieciach z jednym wentylatorem głównym. Przykład prostego schematu kanonicznego sieci przekątnej wraz z grafem przedstawiającym wszystkie łańcuchy od węzła początkowego 1 do węzła końcowego 8 został przedstawiony na rysunku 3.4.1.



Rys. 3.4.1. Schemat kanoniczny sieci (a) oraz wszystkie łańcuchy poprowadzone od węzła początkowego 1 do węzła końcowego 8 przez sieć (b)

Na podstawie rysunki 3.4.1 a można wstępnie stwierdzić, że prądami przekątnymi wobec wentylatora głównego będą prądy powietrza w bocznicach 3 5, 4 6. Potwierdza to analiza grafu (rys. 3.4.1 b), wymienione bocznicę występują w dwóch różnych orientacjach, a mianowicie bocznicę 3 5 występuje w czterech łańcuchach, dwukrotnie w orientacji 3 5 oraz dwukrotnie w orientacji 5 3, zaś bocznicę 4 6 również występuje w czterech łańcuchach, po dwa razy w orientacjach 4 6 i 6 4. Warto zauważyć, że prądy powietrza w bocznicach 3 5 i 4 6 są przekątne względem bocznicę zamykającej 8 1. Czy jednak są one również przekątne, gdy bocznicę zamykającą zostanie wybrana inna bocznicę? Izomorficzna sieć o identycznej strukturze jak na rysunku 3.4.1 zostało pokazana na rysunku 3.4.2, lecz bocznicę zamykającą jest 5 6.



Rys. 3.4.2. Schemat kanoniczny sieci (a) oraz wszystkie łańcuchy poprowadzone od węzła początkowego 6 do węzła końcowego 5 przez sieć (b)

Po przeanalizowaniu łańcuchów od węzła 6 do węzła 5 można stwierdzić, że boczniciami przekątnymi są bocznice 7 4 i 2 3. Dlatego przy wykazywaniu charakteru badanej bocznicy ze względu na jej przekątność bardzo ważnym jest wskazanie węzła początkowego i końcowego sieci. Może więc słuszniej jest uszczegółowienie charakteru bocznicy, poprzez podanie następującego opisu jej charakteru „bocznica x jest przekątna względem bocznicy y”? Przy takim opisie bocznicy możliwym byłoby rozstrzygnięcie o jej charakterze nie tylko względem wentylatora głównego przewietrzania, lecz względem dowolnie wybranej bocznicy. Ta informacja mogłaby okazać się przydatną w przypadku oddziaływania pożaru na przepływy powietrza w sieci. Interesujące jest również zagadnienie przekątności, gdy ma się do czynienia z oddziaływaniem kilku wentylatorów głównych na sieć wentylacyjną lub z pracą wentylatorów pomocniczych i swobodnych [55, 63, 64] (kopalnie LGOM). Problemem stosowania tej metody jest konieczność konstruowania olbrzymiej liczby łańcuchów, w przypadku rzeczywistych sieci wentylacyjnych składających się z kilkuset bocznicy z dużą liczbą prądów przekątnych, liczba wszystkich łańcuchów będzie sięgać kilkanaście lub kilkadziesiąt tysięcy.

W pracy [74] zaproponowano sposób rozstrzygnięcia o przekątności sieci oraz charakterze bocznicy na podstawie znanego rozplywu powietrza w sieci. Badana sieć musi jednakże spełniać warunki acykliczności w sensie dróg oraz być siecią zredukowaną i płaską. Metoda polega na budowaniu dwóch rozłącznych dróg zewnętrznych: od węzła

początkowego sieci w_{ps} do węzła końcowego sieci w_{ks} . Bocznice incydentne z węzłem początkowym sieci w_{ps} , węzłem końcowym sieci w_{ks} oraz należące do wspomnianych dróg posiadają charakter normalny. Natomiast wszystkie pozostałe bocznicę posiadają charakter przekątny. Metoda ta nie ma zastosowania w sieciach niepłaskich. W tej samej pracy podana została klasyfikacja prądów przekątnych, ze względu na konieczność odwrócenia kierunku powietrza w bocznicach sąsiednich do bocznicy badanej. Konieczność tą powoduje wymóg acykliczności sieci oraz I prawo Kirchhoffa.

Oprócz podziału na bocznicę normalne i przekątne, interesującym jest badanie par bocznic. Poza dobrze znanymi połączeniami szeregowymi i równoległymi można znaleźć połączenia szeregowo-przekątne, równoległo-przekątne, quasi-przekątne.

Znana jest także następująca definicja charakteru bocznic bazująca na łańcuchach:

- bocznicę posiada charakter przekątny jeżeli jednocześnie:
 1. istnieją dwa łańcuchy rozłączne od w_{ps} do w_{pb} i od w_{kb} do w_{ks} ,
 2. istnieją dwa łańcuchy rozłączne od w_{ps} do w_{kb} i od w_{pb} do w_{ks} ,
- bocznicę ma charakter normalny jeżeli jednocześnie:
 1. istnieją dwa łańcuchy rozłączne od w_{ps} do w_{pb} i od w_{kb} do w_{ks} ,
 2. żadna para łańcuchów od w_{ps} do w_{kb} i od w_{pb} do w_{ks} nie jest rozłączna
- bocznicę ma charakter wiszący jeżeli jednocześnie:
 1. stopień któregośkolwiek z jej węzłów wynosi $2t - 1$, gdzie t jest liczbą naturalną,
 2. do węzła o stopniu $2t - 1$ jest dołączonych $t - 1$ pętli

Wykorzystanie powyższej definicji zmniejsza liczbę łańcuchów potrzebnych do wyznaczanie, lecz powoduje konieczność badania par łańcuchów. Sposób wykorzystujący podaną definicję ma zastosowanie również w sieciach niepłaskich. Dla sieci niepłaskich spotykane jest stwierdzenie, że prądami normalnymi są jedynie prądy powietrza w bocznicach incydentnych z węzłem początku sieci w_{ps} i z węzłem końca sieci w_{ks} . Stwierdzenie to jest bardzo często prawdziwe, ale istnieją sieci niepłaskie, które posiadają bocznicę normalne względem bocznicy zamykającej nie będące incydentne z wymienionymi węzłami początku i końca sieci.

Ciekawym wydaje się porównanie kilku rozplywów powietrza w sieciach z liczbą wentylatorów głównych większą niż jeden. Zakładając, że przez kopalnię przepływa całkowity wydatek powietrza V_c , w pierwszym rozplywie zakłada się pionowe charakterystyki wentylatorów o wydatkach $V = \text{const}$. Dla jednego z wentylatorów charakterystyka ma postać $V \approx V_c$, a dla pozostałych $V \approx 0$. Obliczany i zapisywany jest rozplyw powietrza w sieci. Następnie kolejnemu wentylatorowi nadaje się charakterystykę

$V \approx V_c$ i oblicza się rozptyw powietrza. Proces powtarzany jest dla l_w wentylatorów. W dalszej kolejności badane są rozptywy powietrza, jeżeli w badanych bocznicach nastąpią różne kierunki przepływu powietrza to mają one (bocznicę) charakter przekątny. Niektóre prądy przekątne mogą nie ulec zmianom kierunku, nie może więc podany sposób jednoznacznie decydować o charakterze bocznic, lecz tylko mieć pewną wartość pomocniczą. Rozptywy powietrza uzyskane w obliczeniach spełniają kryterium acykliczności sieci.

Badania charakteru bocznic mogą odbywać się na podstawie wariantowych wyników uzyskanych w obliczeniach rozptywu powietrza, przy uprzednim nadaniu oporu bocznic w której dochodzi do zaburzenia wartości 0 lub likwidacji tejże bocznic. Wariantowość obliczeń polega na zakładaniu zaburzenia w kolejnych bocznicach należących do sieci wentylacyjnej [68]. Uzyskane różne kierunki przepływu powietrza świadczyłyby o przekątności bocznic. Sposób ten, również ma charakter pomocniczy, gdyż w niektórych przypadkach, aby doszło do odwrócenia kierunku przepływu powietrza konieczna jest zmiana oporów kilku bocznic. Natomiast rozważanie wszystkich możliwych kombinacji zaburzeń w wyrobiskach wydaje się zbyt czasochłonne, jeżeli badane będą rzeczywiste struktury kopalniane. Zaletą powyższych dwóch metod staje się informacja o wydatkach powietrza w kolejnych wariantach obliczeniowych, a nie tylko o ich kierunkach.

Istotnym jest kwestia częstotliwości występowania zmian w sieci. Niektóre zamiany mogą pojawiać się często, wystąpienie innych może być bardzo mało prawdopodobne. Badanie sieci tylko na podstawie zapisu połączeń pomiędzy węzłami, nie uwzględniając oporów bocznic, ani prawdopodobieństwa wystąpienia zaburzenia, może okazać się mało miarodajne. Oprócz zagrożeń związanych ze zmianami kierunku przepływu powietrza, a więc pośrednio z występowaniem prądów przekątnych, można wykazać pewne korzyści związane z występowaniem tychże prądów, mianowicie warto je wykorzystać w drogach ucieczkowych, a także przy pasywnym gaszeniu pożarów podziemnych [145].

Informacja o ewentualnym, charakterze przekątnym bocznic może okazać się użyteczną przy zagadnieniu obliczania rozptywu wymuszonego powietrza. Szczególnie przydatną jest znajomość charakteru bocznic przy poszukiwaniu prądów zależnych, a w szczególności zużytych prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. Wynika to z właściwości wynikającej z definicji prądów zależnych, według której każdy prąd zależny jest prądem przekątnym. Dodać należy, że nie każdy prąd przekątny musi być prądem zależnym. Zdefiniowanie prądu jako zależnego wynika z wcześniejszego wskazania odbiorów powietrza oraz wydzielenia w sieci wentylacyjnej strefy prądów świeżych i zużytych.

3.5. Badanie planarności sieci

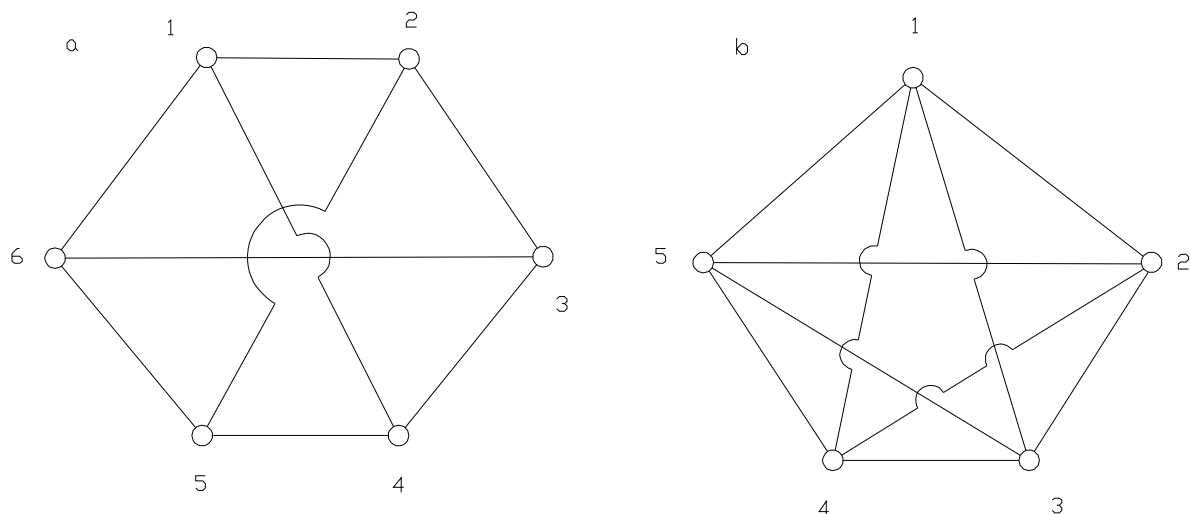
Jednymi ze sposobów przedstawiania kopalnianych sieci wentylacyjnych są schematy: przestrzenne, kanoniczne, potencjalne. Schematy przedstawiają wyrobiska na płaskim obszarze rysowania, natomiast same wyrobiska oraz ich węzły początkowe i końcowe posiadają położenie w przestrzeni trójwymiarowej. Posiadanie przez węzły wymiaru głębokości staje się przyczyną fikcyjnego przecinania się bocznic po ich zrzutowaniu na płaszczyznę poziomą. Dlatego istotnym wydaje się pytanie, czy jest możliwość uniknięcia przy rysowaniu schematu kanonicznego fikcyjnych przecięć bocznic? Zagadnienie to znane jest w teorii grafów jako badanie planarności grafu [146].

Na początku zostaną zdefiniowane graf planarny (płaski) oraz graf nieplanarny. Graf, który można narysować na płaszczyźnie bez przecięć – to znaczy tak, by żadne dwie krawędzie nie przecinały się na rysunku poza wierzchołkiem, z którym obie są incydentne jest grafem planarnym. Wszystkie pozostałe grafy nie spełniające podanej definicji są grafami nieplanarnymi. K. Wagner udowodnił, że każdy graf planarny może być narysowany za pomocą odcinków. Na podstawie podanego rozróżnienia grafów można dokonać podziału sieci wentylacyjnych na:

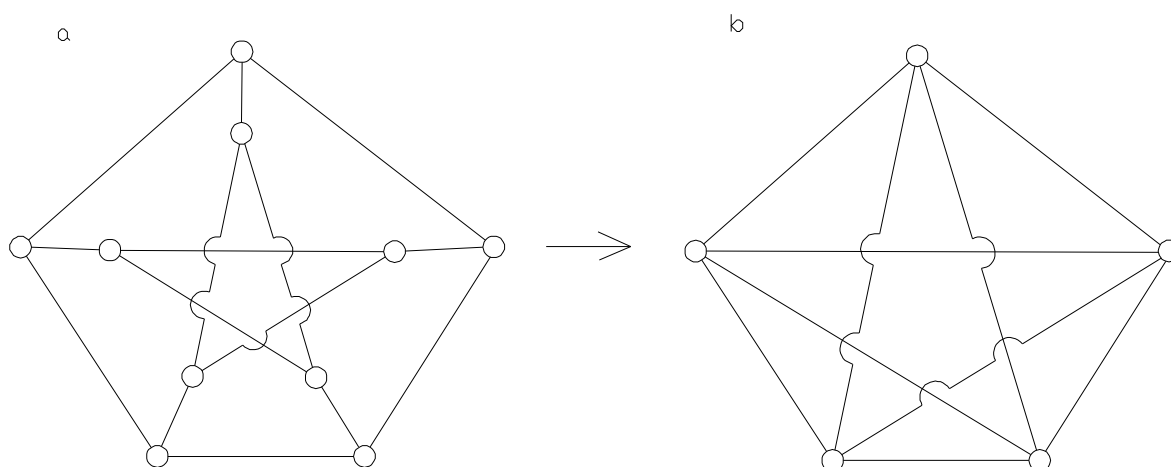
- sieci płaskie – które można przedstawić za pomocą grafu planarnego,
- sieci niepłaskie – które nie mogą być przedstawione za pomocą grafu płaskiego.

Nieplanarność sieci powoduje nie tylko trudności w rysowaniu schematu kanonicznego, lecz również komplikuje (jak wspomniano w rozdziale 3.4) badanie charakteru bocznic. Dla sieci niepłaskich określenie wpływu zaburzenia na rozpływ powietrza przy wykorzystaniu jedynie schematu kanonicznego jest znacznie utrudnione [74, 130].

W teorii grafów znane są kryteria decydujące o planarności grafu lub jej braku. Jednym z najbardziej znanych jest kryterium Kuratowskiego, które brzmi następująco: „Dany graf jest planarny wtedy i tylko wtedy, gdy nie zawiera podgrafu ściągającego do grafu pełnego K_5 o pięciu wierzchołkach lub do grafu półpełnego $K_{3,3}$ o sześciu wierzchołkach”. Grafy Kuratowskiego oraz przykład ściągłości podgrafu do grafu K_5 został podany na rysunkach 3.5.1 i 3.5.2.



Rys. 3.5.1. Grafy Kuratowskiego półpełny $K_{3,3}$ (a) oraz pełny K_5 (b)



Rys. 3.5.2. Przykład grafu nieplanarnego Petersena (a) ściągniętego do grafu K_5 (b)

Znane jest również kryterium wykorzystujące twierdzenia Eulera (1750 r.), które brzmi:

„Jeśli G jest spójnym planarnym grafem prostym mającym n wierzchołków (gdzie $n \geq 3$) i m krawędzi, to $m \leq 3n - 6$. Jeżeli ponadto graf G nie posiada trójkątów, to $m \leq 2n - 4$ ”.

Kolejne twierdzenie wykorzystuje pojęcie grubości grafu:

„Niech G będzie grafem prostym mającym n wierzchołków i m krawędzi. Wtedy grubość $t(G)$ grafu G spełnia nierówność

$$\begin{aligned} t(G) &\geq \lceil m/(3n-6) \rceil \\ t(G) &\geq \lfloor (m+3n-7)/(3n-6) \rfloor \end{aligned} \quad , \quad [3.5.1]$$

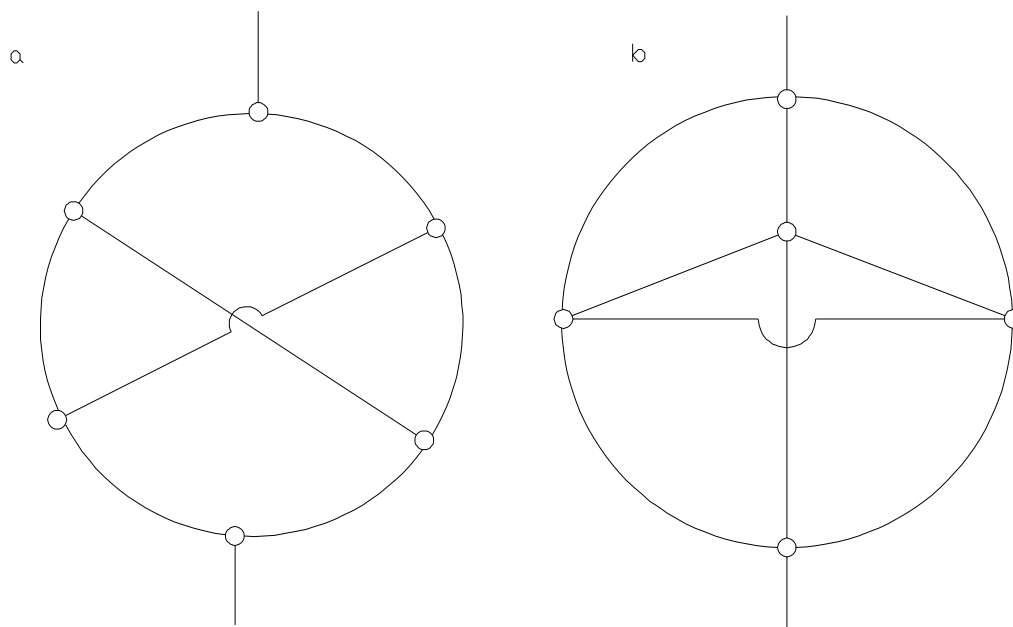
Jeżeli $t(G)$ uzyskuje wartość większą od 1, wtedy graf G jest grafem niepłaskim. Znajomość grubości grafu może być przydatna przy rysowaniu schematu kanonicznego.

Stwierdzenie o planarności sieci wyłącznie na podstawie podanych kryteriów liczbowych może czasami doprowadzić do sytuacji, gdy graf nieplanarny zostanie zaklasyfikowany do grafów planarnych, aczkolwiek niekiedy zastosowanie podanych kryteriów liczbowych doprowadza do natychmiastowego wykazania jego nieplanarności.

Wyszukiwanie z kolei grafów Kuratowskiego, a w szczególności podgrafów ściągalnych do grafu Kuratowskiego w dużych sieciach wentylacyjnych stwarza znaczne problemy.

J. Sułkowski [134] wykorzystuje przy uproszczeniu sieci normalnej do pojedynczej bocznicy następującą właściwość grafów znaną jako twierdzenie Whitney'a „Graf ma graf dualny wtedy i tylko wtedy, gdy jest grafem planarnym”. Tworzenie kolejnych grafów dualnych do swoich poprzedników, przy jednoczesnej likwidacji półwęzłów (co odpowiada redukcji połączenia szeregowego i równoległego) doprowadza we wspomnianej pracy do zredukowania sieci. Wykorzystanie grafów dualnych umożliwia więc badanie planarności sieci (uwaga ta dotyczy nie tylko sieci normalnych). Tworzenie modelu struktury sieci dualnej dla sieci płaskiej zredukowanej zostało również ujęte w pracach M. Kolarczyka [74, 87]. W pracy został zaproponowany algorytm wykorzystujący zależności pomiędzy macierzami strukturalnymi sieci S oraz sieci dualnej do niej S^* pomocny przy tworzeniu zapisu cyfrowego macierzy sieci dualnej. Geometryczna idea dualności została pokazana już w starożytności przy badaniu pewnych własności brył, również dzisiaj jest przydatną w wielu dziedzinach nauki.

Także w pracy J. Sułkowskiego [130] wskazane zostały elementarne grafy niepłaskie różniące się w pewnym stopniu od grafów Kuratowskiego. Poszukiwanie tych grafów powinno się okazać łatwiejszym niż stosowanie grafów K_{33} i K_5 . Na rysunku 3.5.3 zostały przedstawione elementarne grafy niepłaskie α oraz β . Graf α powstał z grafu K_{33} po usunięciu jednej z krawędzi „wewnątrz” sześciokąta, podobne przekształcenie zostało dokonane dla grafu β powstałego z grafu K_5 . Dokonane usunięcia były możliwe ze względu na stosowanie zamkniętych sieci wentylacyjnych. Według autora występowanie w praktyce grafów typu β jest mało prawdopodobne ze względu na wysoki, czwarty stopień każdego z pięciu wierzchołków.



Rys. 3.5.3. Elementarne grafy niepłaskie α (a) oraz β (b)

Znane jest twierdzenie Mac Lane'a o planarności grafu : „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”. M. Kolarczyk [74] wykorzystuje to twierdzenie przy ocenianiu planarności sieci. W zaproponowanej metodzie korzysta z osiągalności w zbiorze węzłów, wyznaczane są również cyklo – komórki oraz definiowane tzw. „narożniki”. Wykorzystywanym w metodzie jest charakter węzłów (rys. 3.1.1.) na podstawie którego można wyznaczyć cyklo – komórki. W pracy wymieniono cztery sposoby ich wyznaczania.

W literaturze [146] podawane są próby przedstawienia grafu na innych powierzchniach niż płaszczyzna. Próby narysowania grafów Kuratowskiego na torusie wykazały, że uzyskany rysunek nie posiadał przecięć poza wierzchołkami. Znane jest pojęcie genusu, zgodnie z nim sfera i powierzchnia są genusami 0, natomiast torus genusem 1. Dlatego grafy $K_{3,3}$ i K_5 są grafami genusu 1. Istnieją grafy wyższych genusów (np. graf pełny K_8 jest grafem genusu 2), ale ich występowanie w schematach kanonicznych istniejących kopalń wydaje się mało prawdopodobnym. Tak więc odwzorowanie na genusach 1 może okazać się dla praktyki wentylacji kopalń wystarczającym.

Podsumowując niniejszy rozdział można stwierdzić, iż grafy uzyskane na schematach kanonicznych całych sieci wentylacyjnych są przeważającej większości niepłaskie. Jednak występowanie oraz możliwość wydzielenia podsieci powoduje, że badanie ich planarności

jest istotne. Po wydzieleniu podsieci i stwierdzeniu ich charakteru, przy jednoczesnym wykazaniu planarności sieci zredukowanej (rozdział 3.6), możliwym staje się wskazanie podsieci powodujących nieplanarność całej sieci. W tym przypadku zastąpienie nieplanarnych podsieci pojedynczymi bocznikami umożliwia przedstawienie schematu kanonicznego w formie planarnej.

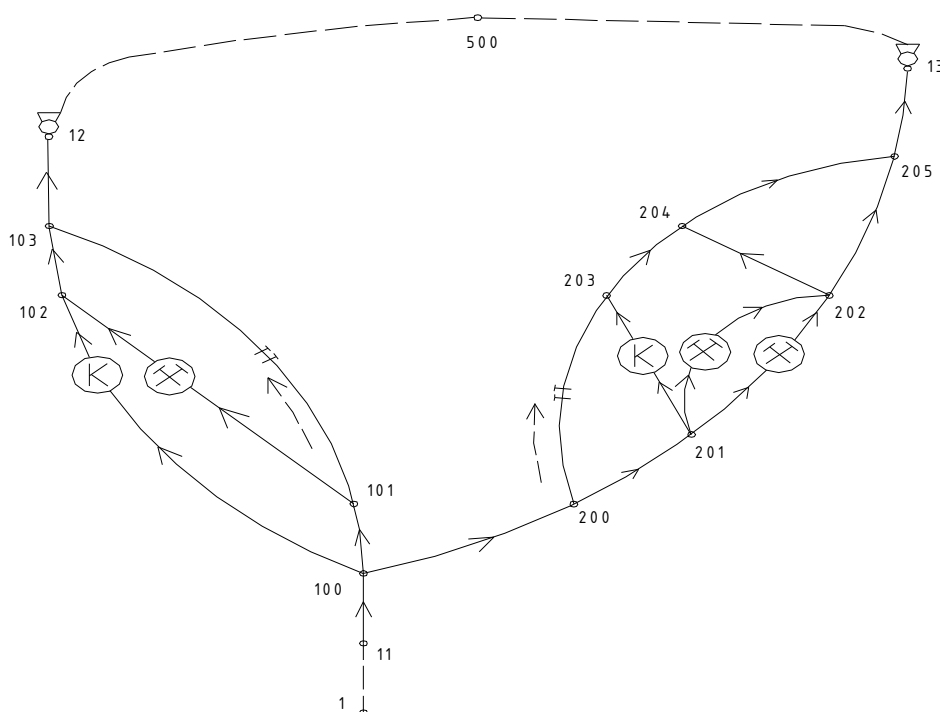
3.6. Wydzielanie podsieci

W niektórych zagadnieniach wentylacji kopalń użyteczne jest posługiwanie się pojęciem podsieci oraz jej otoczenia. Umożliwia to łatwiejsze zauważenie pewnych właściwości sieci wentylacyjnej oraz oddziaływania zachodzącego pomiędzy jej elementami. Powszechnie znane jest zastępowanie sieci wentylacyjnej pojedynczą boczniką a następnie badanie jej współpracy z wentylatorem w sieciach w których występują tylko jeden wentylator głównego przewietrzania [13, 110]. Jeżeli istnieje możliwość wydzielenia podsieci oddziałowych, a następnie zastąpienie ich boczniką o charakterystyce wynikającej ze struktury podsieci oraz charakterystyk jej elementów, to różnice w przepływie powietrza powstałe dzięki zamierzonej zmianie oporów wyrobisk lub powstałych zaburzeń stają się bardziej widoczne poprzez analizę układu podsieć – otoczenie [71, 73]. Po wydzieleniu podsieci również możliwe jest badanie wpływu zmian zachodzących w niej samej bez konieczności przeprowadzania obliczeń dla całej sieci. Szczególnie w podsieciach w których występują wyłącznie elementy pasywne przydatna jest znajomość rozplywu powietrza. Także, jak stwierdzono w podrozdziale 3.5, wydzielenie podsieci jest istotne w problematyce badania planarności schematów kanonicznych.

Podsieć wentylacyjna jest fragmentem sieci wentylacyjnej, który posiada dwa węzły wspólne z resztą sieci nazywaną otoczeniem podsieci. W terminologii teorii grafów [146] jest to pewien podgraf grafu G tworzącego sieć, w którym jeden z wierzchołków wspólnych z dopełnieniem podgrafu do grafu G nie posiada swoich poprzedników, a drugi z wierzchołków nie posiada swoich następników. Sama więc sieć musi spełniać warunek digrafu acyklicznego w sensie dróg. Wyodrębnienie podsieci, a wraz z nią węzłów początkowego i końcowego powoduje, że przez przynajmniej jeden z tych dwóch węzłów,

zagrożenie powstałe w podsieci może się tylko rozprzestrzeniać na całą sieć. Dlatego występowanie podsieci jest istotne dla profilaktyki zagrożeniowej [145].

Sieć przedstawiona na rysunku 3.6.1 posiada dwie podsieci, mianowicie, pierwszą złożoną ze zbioru bocznic 100 102, 100 101, 101 102, 101 103, 102 103, węzłami początkowym i końcowym tej podsieci są odpowiednio węzeł 100 i 103 oraz drugą podsieć w skład której wchodzi bocznic 200 201, 200 203, 201 203, 201 202, 201 202, 202 204, 202 205, 203 204, 204 205, węzłami początkowym i końcowym są węzeł 200 i 205.



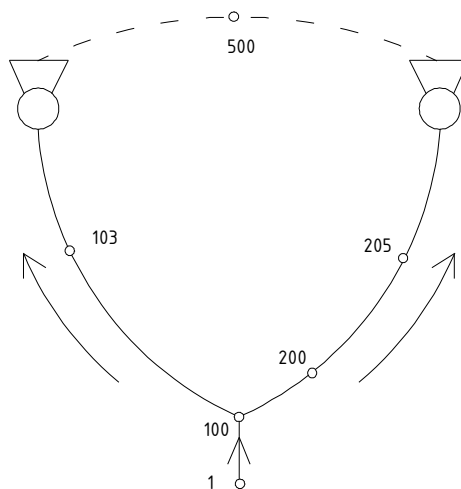
Rys. 3.6.1. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej zawierający dwie podsieci

Pokazane podsieci posiadają charakter przekątny oraz składają się z elementów pasywnych. W podsieciach złożonych wyłącznie z elementów pasywnych można stwierdzić stałość ilorazu wydatków powietrza dla dowolnie wybranych dwóch bocznic wchodzących w skład badanej podsieci, co można zapisać wzorem:

$$\frac{V_i}{V_j} = const, \quad \text{dla dowolnie wybranych bocznic } i, j \text{ wchodzących w skład podsieci} \quad [3.6.1]$$

Zależność ta jest przydatna w przypadku podsieci w których opory nie ulegają zmianom, gdyż pomiar prędkości powietrza w jednej z bocznic należących do podsieci pozwala na obliczenie wydatków powietrza w pozostałych, jeżeli znany był wcześniejszy rozpływ powietrza. Dlatego łatwo jest ocenić wpływ zmian charakterystyki otoczenia na wydatki powietrza w bocznicach należących do tego typu podsieci.

Sieć z rysunku 3.6.1 po zredukowaniu została przedstawiona na rysunku 3.6.2. Bocznice 100 103 oraz 200 205 odpowiadają podsieciom z wcześniejszego rysunku.



Rys. 3.6.2 Sieć zredukowana powstała po uproszczeniu sieci z rysunku 3.6.1.

Oprócz pokazanych podsieci o charakterze przekątnym, najprostszymi typami podsieci są składające się wyłącznie z bocznic połączonych szeregowo lub równolegle. W pracy [131] ten typ podsieci został zaliczony do I typu podsieci (sieci) elementarnych. Wyszukiwanie w strukturze sieci i zastąpienie bocznic połączonych szeregowo bocznicą zastępczą o oporze wyliczanym ze wzoru:

$$R_{zs} = \sum_{i=1}^i R_i \quad [3.6.2]$$

gdzie:

R_{zs} - opór zastępczy połączonych szeregowo bocznic,

nie powinno stwarzać problemu. Równie proste jest wskazanie połączeń równoległych oraz obliczenie oporu zastępczego przy wykorzystaniu wzoru:

$$R_{zr} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^i \frac{1}{\sqrt{R_i}}} \right)^2 \quad [3.6.3]$$

gdzie:

R_{zr} - opór zastępczy połączonych równoległego bocznic,

Przy uproszczeniach połączenia równoległego wykorzystywane są również pojęcia otworu równoznacznego i temperamentu. Ciąg przekształceń polegający na naprzemiennym upraszczaniu połączeń szeregowych i równoległych (jako pierwsze upraszczane są połączenia

szeregowo) doprowadzający do sytuacji, gdy w sieci nie występują już wymienione typy połączeń, pozwala na stwierdzenie o charakterze sieci normalnym lub przekątnym.

Dla podsieci (sieci) przekątnych powyższy sposób postępowania nie przynosi skutku. Tak więc koniecznym staje się inny sposób wyszukiwania tego typu podsieci, określanych w literaturze [131] jako sieci (podsieci) elementarne typu II (reprezentowanej przez pojedynczą sieć przekątną prostą) oraz III. Przy poszukiwaniu takich podsieci M. Kolarczyk wykorzystuje w swojej pracy [74] relację starszeństwa węzłów, nadając każdemu z węzłów przynależność do i -tej warstwy. Następnie korzystając z dróg niezależnych w liczbie v przechodzących przez sieć (a tym samym niektóre z dróg przechodzą przez podsieć), wyznacza węzeł początkowy oraz węzeł końcowy podsieci. Wyznaczenie tych węzłów odbywa się na podstawie następującej właściwości podsieci: „fragment sieci jest podsiecią o węźle początkowym w_{pp} oraz węźle końcowym w_{kp} , jeżeli wszystkie drogi przechodzące przez sieć i przez ten fragment przechodzą przez węzeł w_{pp} i w_{kp} ”. Po wyszukaniu podsieci następuje ich redukcja do pojedynczych bocznic, a w dalszej kolejności poszukiwanie podsieci elementarnych I typu. Jeżeli takowe podsieci występują upraszcza się je, a następnie poszukuje się podsieci typu II oraz III. W momencie braku jakichkolwiek możliwych do wyznaczenia podsieci, zostaje uzyskana tzw. sieć zredukowana. W literaturze spotykane jest również przekształcenie typu „gwiazda – trójkąt” znane w elektrotechnice.

Dla wyznaczonej podsieci możliwe jest pokazanie jej charakterystyki zastępczej. Charakterystyka ta będzie określać zależność pomiędzy wydatkiem zastępczym powietrza przepływającego przez podsieć, a spadkiem lub przyrostem naporu na drodze od węzła początkowego do węzła końcowego podsieci. Jeżeli w podsieci występują wyłącznie elementy pasywne, to kształt tej charakterystyki będzie parabolą przechodzącą przez punkt 0,0 w układzie $\Delta W - V$ (spadek naporu – wydatek powietrza), której można nadać stały opór R . W przypadku występowania elementów aktywnych np. wentylatorów kształt będzie odbiegał od wspomnianej paraboli, a posługiwanie się stałym oporem R w obliczeniach może doprowadzić do błędów. Dlatego w przypadku sieci z liczbą wentylatorów głównych większą niż jeden, redukcja sieci do pojedynczej bocznic o oporze R wydaje się być niepoprawne. Również dla otoczenia podsieci możliwym staje się wykonanie charakterystyki zastępczej. W praktyce aproksymowanie linią prostą kształtu charakterystyki otoczenia daje dość dobre rezultaty, natomiast aproksymowanie krzywymi drugiego stopnia wydaje się w pełni wystarczające [73, 74, 78, 80]. W literaturze spotykane jest wykorzystanie rozwinięcia w szereg Taylora charakterystyki otoczenia, jeżeli znany jest aktualny punkt pracy układu podsieć – otoczenie. Rozwinięcie w szereg Taylora ograniczane jest do drugich

wyrażeń. Posługiwanie się charakterystykami zastępczymi otoczenia podsieci pozwala na wskazanie wielkości wpływu zaburzenia zachodzącego w podsieci (zmieniającego charakterystykę podsieci) na zmianę ilości powietrza przepływającego przez podsieć. Dla silnie nachylonych charakterystyk zmiany wydatków powietrza będą słabiej odczuwalne niż dla płaskich charakterystyk otoczenia podsieci. Jeżeli rozważane są spadki naporu w podsieci, to zachodzi zależność odwrotna.

3.7. Pozostałe metody analizowania struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej

Przy analizowaniu niektórych cech struktury sieci wentylacyjnej znajomość rozplywu powietrza nie jest konieczna. Takie cechy struktury jak przekątność, planarność nie są zależne od oporów bocznic, lecz wynikają wyłącznie z połączeń pomiędzy elementami sieci. Należy jednak stwierdzić, że uzyskanie aktualnego rozplywu powietrza ułatwia wykazanie pewnych cech charakteru sieci. Znając aktualny stan pracy sieci oraz posiadając wyznaczone bocznicę odbioru można przy zastosowaniu przekroju całkowitego rozdzielić sieć na następujące składowe części sieci:

- bocznicę odbioru i straty tworzące przekrój całkowity,
- strefa powietrza świeżego,
- strefa powietrza zużytego,
- bocznicę zamykającą (jeżeli stosowana jest sieć zamknięta).

Dla poszczególnych części można przeprowadzać analizę cech struktury sieci wymienionych we wcześniejszych rozdziałach. Szczególnie przydatną staje się analiza, gdy mamy do czynienia z zagadnieniami rozplywu wymuszonego. Zadanie wydatków powietrza we wszystkich bocznicach należących do p – c powoduje wyraźny rozdział pomiędzy wymienionymi strefami. Także analiza ilości powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego przez odbiory daje informacje o rezerwach powietrza i ich ewentualnym wykorzystaniu.

Na podstawie znanych wydatków powietrza H. Bystron podaje w publikacji [16] stopień, stosunek stabilności kierunku prądu i liczbę niezależności prądu powietrza. Wymienione wielkości mają charakteryzować bezpieczeństwo sieci wentylacyjnej. W artykule [15] ten sam autor bada wzajemny wpływ elementów sieci i pożaru na kierunki przepływu prądów powietrznych w kopalni. W pracach H. Bystronia i A. Strumińskiego [30,

119, 128] podawana jest na podstawie wartości mocy straconej, informacja o charakterze prądu powietrza. W literaturze [68] spotykana jest klasyfikacja prądu powietrza ze względu na liczbę możliwych odwróceń wywołanych symulowanym pożarem lub obwalem. J. Chojcan [32] wskazuje na wpływ elementarnej zmiany oporu bocznicy na rozplływ powietrza w sieci. Podobną analizę wykonuje W. Roszczyniański nadając charakter bocznicom ze względu na przebieg charakterystyki $V_i = f(R_j)$. Wyniki uzyskiwane są za pomocą kilku rozwiązań sieci przy różnych wartościach oporu R_j . Badania prowadzone przez J. Chojcana zostały rozwinięte w pracy [74] przez M. Kolarczyka. Ukazany został sposób obliczania pełnej macierzy wrażliwości wydatków na elementarne zmiany oporów bocznic. Wartości wrażliwości uzyskane w obliczeniach mogą być przydatne przy stwierdzaniu wzajemnego charakteru bocznic, który został zaproponowany w pracy. S. Trenczek w pracy [142] podaje warunek trwałości kierunku przepływu powietrza dla prądów schodzących.

Miarą złożoności sieci wentylacyjnej może zostać zaproponowana przez J. Sułkowskiego [135] liczba σ obliczana ze wzoru:

$$S = \frac{n-2}{2 \cdot n - 4} \quad [3.7.1]$$

Sieci wentylacyjne można podzielić na następujące grupy w zależności od wartości σ :

sieci o strukturze bardzo prostej	$0 \leq \sigma \leq 0,25$,
sieci o strukturze prostej	$0,25 \leq \sigma \leq 0,5$,
sieci o strukturze złożonej	$0,5 \leq \sigma \leq 0,75$,
sieci o strukturze bardzo złożonej	$0,75 \leq \sigma \leq 1$

W publikacji [62] autorzy podają trzy struktury w sensie niezawodności: szeregową, w której uszkodzenie pojedynczego elementu powoduje utratę zdatności, równoległą, gdy dopiero uszkodzenie wszystkich elementów powoduje utratę zdatności i mieszaną.

K. Wierziński [145] w swojej pracy analizował wpływ udostępnienia poziomu, liczby i lokalizacji szybów, rozcięcia pola eksploatacyjnego na strukturę sieci wentylacyjnej.

Należy zauważyć, że sieć wentylacyjna nie jest zaprojektowana na stałe, lecz w ciągu okresu trwania kopalni przechodzi znaczne przeobrażenia. Wykonana analiza struktury sieci wentylacyjnej już po krótkim okresie czasu może stać się nieaktualną. W pracy D. Musioła [107] dokonano podziału czasu istnienia kopalni na trzy okresy: budowy kopalni, osiągania maksymalnego wydobycia oraz likwidacji kopalni, wskazując jednocześnie na zmiany zachodzące w każdym okresie w strukturze sieci. Nie wydaje się, aby analiza wykonana w pierwszym okresie czasu mogła być aktualna dla okresu likwidacji kopalni. Także K. Matuszewski [104, 105] wskazuje na szczególną konieczność dokonywania analiz

odnośnie kopalń przewidzianych do połączenia z kopalniami sąsiednimi. Analizie poddawana miałyby być celowość takiego połączenia zarówno w sensie ekonomicznym jak i bezpieczeństwa. W. Dziurzyński badał wpływa sieci wentylacyjnej na zjawiska związane z pożarami [41, 42].

4. Analiza metod wyznaczania prądów zależnych w tym w szczególności prądów zależnych występujących pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych

4.1. Wprowadzenie

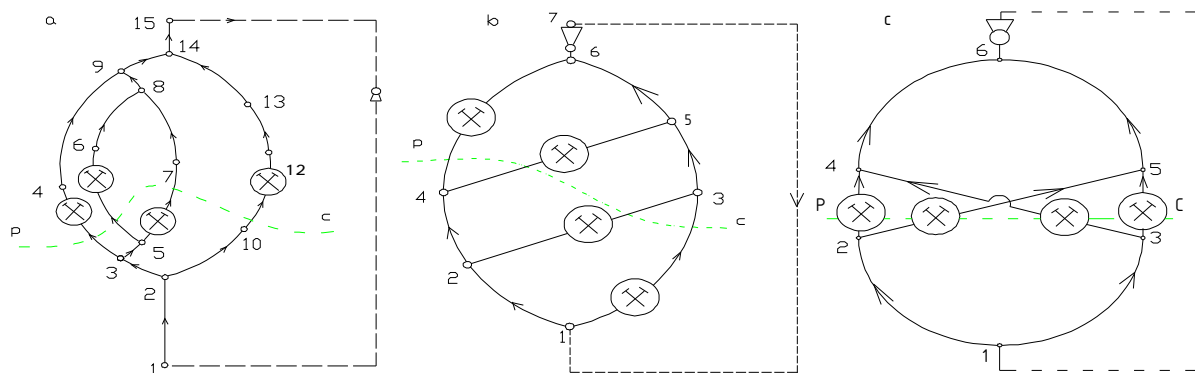
Eksploatacja węgla kamiennego pociąga za sobą liczne zagrożenia, do których należy zaliczyć zagrożenie pożarowe, metanowe, wybuchem pyłu węglowego, cieplne, wodne, tąpniętami i inne. Część z tych zagrożeń może być skutecznie zwalczana za pomocą metod wentylacyjnych, w tym dzięki intensywnemu przewietrzaniu wyrobisk. Struktura sieci wentylacyjnej wpływa nie tylko na możliwość zwalczania zagrożenia, lecz również na rozchodzenie się skutków zagrożenia w wyrobiskach kopalnianych. Poprzez rozchodzenie się skutków zagrożenia można rozumieć zarówno prędkość rozwoju strefy zagrożonej, lecz także jej zasięg. Znaczącą przy wyznaczaniu wpływu powstałego zagrożenia jest znajomość miejsca jego powstania [12, 13, 110, 123, 124, 138, 145].

Jednym z największych zagrożeń występujących w kopalni jest możliwość powstania pożaru podziemnego, który może mieć charakter egzogeniczny lub, co jest częstsze endogeniczny. W początkowej fazie rozwoju pożaru, miejsce jego powstania nie zawsze jest znane [12, 13], co uniemożliwia ustalenie strefy zagrożonej. Znane są sposoby ustalenia miejsca pożaru, w późniejszych jego stadiach, na podstawie kierunku przepływu dymów pożarowych [15]. Jeżeli miejsce pożaru zostało stwierdzone to możliwym staje się wyznaczenie wspomnianej strefy (jeżeli nie dochodzi do niektórych zaburzeń wywołanych pożarem np. do odwrócenia prądów bocznych lub cofania się prądu głównego), jest to wtedy tzw. strefa bezpośredniego zadymienia. Na wielkość strefy zagrożonej wpływa struktura sieci wentylacyjnej, a w szczególności występowanie prądów zależnych w strefach powietrza świeżego oraz zużytego. W zdecydowanej większości przypadków prądy zależne powodują zwiększenie zasięgu strefy zagrożonej [145].

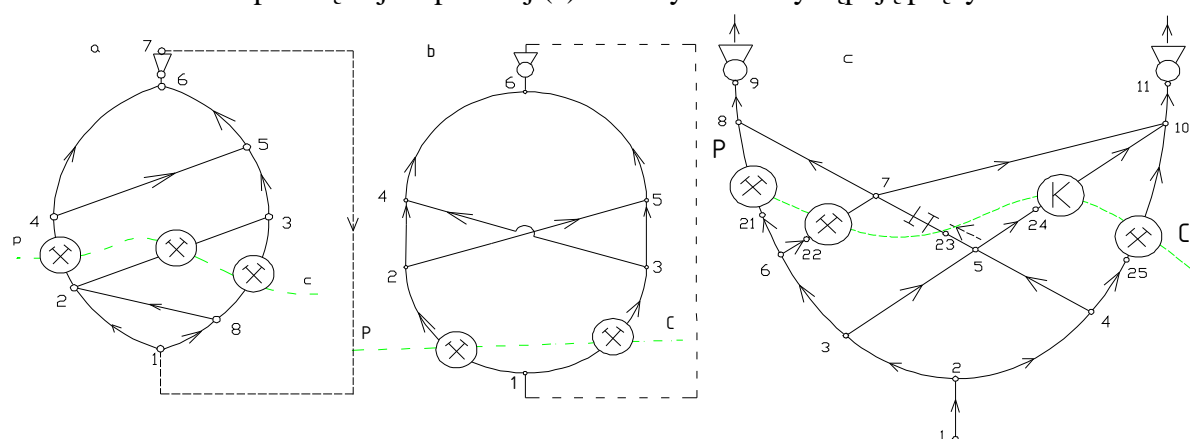
Jak wskazano wcześniej w rozdziale 3.3. istnieje możliwość przeprowadzanie przez sieć przekrojów całkowitych, w tym przekroju $p=c$ przechodzącego przez wszystkie bocznicę odbioru powietrza. Przekrój taki rozdziela sieć wentylacyjną na strefę powietrza świeżego i zużytego. Dlatego każdą bocznicę sieci wentylacyjnej można zaliczyć do odpowiedniej strefy lub zaklasyfikować ją jako bocznicę odbioru. Podobną klasyfikację można przeprowadzić również dla węzłów, rozdzielając je na węzły należące do strefy świeżej lub

zużytej. Przy takim podziale sieci wentylacyjnej należy dokonać rozdziału prądów zależnych na prądy zależne występujące w strefie powietrza świeżego i prądy zależne należące do strefy powietrza zużytego. Te ostatnie dodatkowo można rozdzielić na prądy zależne zużyte należące do podsieci jednego wentylatora oraz zużyte prądy zależne łączące podsieci wentylatorów głównych. Prądy zależne posiadają zawsze charakter przekątny, co w pewnych zagadnieniach teorii wentylacji kopalń posiada znaczenie pozytywne. Wady i zalety występowania prądów zależnych w obydwu strefach powietrza zostaną szerzej omówione w rozdziale 4.2. Należy dodać, że w procesie zespolenia sąsiednich kopalń liczba prądów zależnych powinna znacząco wzrastać.

Przykłady schematów kanonicznych sieci wentylacyjnych w których nie występują prądy zależne zostały pokazane na rysunku 4.1.1. Na rysunku 4.1.2 przedstawione zostały schematy kanoniczne sieci zawierające prądy zależne.



Rys. 4.1.1. Schematy kanoniczne sieci normalnej (a), sieci przekątnej płaskiej (b) oraz sieci przekątnej niepłaskiej (c) w których nie występują prądy zależne



Rys. 4.1.2. Schematy kanoniczne sieci przekątnej płaskiej (a), sieci przekątnej niepłaskiej (b) oraz sieci przekątnej z dwoma wentylatorami głównego przewietrzania (c) zawierającymi prądy zależne

W sieciach wentylacyjnych pokazanych na rysunku 4.1.1. brak prądów zależnych w strefach świeżego oraz zużytego powietrza powoduje jak wspomniano uproszczenie obliczeń związanych z rozplływem wymuszonym do rozwiązania układu równań liniowych z możliwością wykorzystania metody Sałustowicza. Wykorzystując prawo Kirchhoffa dla węzłów otrzymuje się rozplływ powietrza w sieci wentylacyjnej. Bocznice 2 4 oraz 3 5 (rys 4.1.1 c) zostały narysowane linią prostą ze względu na ich przekątność względem bocznic zamykającej (atmosfery) 6 1.

Wszystkie sieci przedstawione na rysunku 4.1.2. zawierają prądy zależne. Płaska sieć przekątna (4.1.2a) zawiera prąd zależny w strefie świeżej 8 2 oraz prąd zależny w strefie zużytej 4 5. Nieplanarna sieć przekątna (4.1.2b) zawiera prądy zależne w strefie zużytej 2 5 oraz 3 4. Sieć (4.1.2c) zawiera prądy zależne w strefie świeżej 3 5 oraz 4 5 oraz prądy zależny w strefie zużytej 7 10 oraz 7 8. Ze względu na możliwość wyznaczenia dwóch podsieci wentylatorów głównych prądy 7 10 oraz 7 8 są nie tylko zużytymi prądami zależnymi, lecz również zużytymi prądami zależnymi łączącymi podsieci dwóch wentylatorów głównych (międzysystemowym). Należy zauważyć, iż w podanej sieci (4.1.2c) likwidacji którejkolwiek bocznicy z prądami „międzysystemowymi” powoduje, że drugi prąd przestaje być nie tylko „międzysystemowym” lecz również zużytym zależnym.

Dla sieci z prądami zależnymi rozplływ wymuszony nie może być wyznaczony za pomocą metody Sałustowicza, co wynika z występowania wewnętrznych oczek o nieznanym a priori rozplwywie powietrza np. oczka 1 2 8 1 oraz 4 5 6 4 na rysunku 4.1.2a. Rozplływ ten może być obliczony metodami przybliżonymi (rozdział 2), a w niektórych bardzo prostych przypadkach metodami analitycznymi. Dla sieci pokazanej na rysunku 4.1.2a, istnieją dwa oczka wewnętrzne. Znalezienie rozplwywu powietrza w tych oczkach wiąże się z rozwiązaniem układu dwóch równań kwadratowych, wynikających z II prawa Kirchhoffa dla oczek wewnętrznych. W sieci przedstawionej na rys. 4.1.2c dzięki występowaniu prądów „międzysystemowych” istnieje dodatkowo możliwość skierowania określonej ilości powietrza na każdy z wentylatorów. Wykorzystanie wyłącznie z praw Kirchhoffa nie dostarcza jednoznacznego rozwiązania ze względu na zadane kryterium optymalizacyjne. Koniecznym staje się zastosowanie dodatkowych warunków.

4.2. Zalety oraz wady występowania prądów zależnych w kopalnianych sieciach wentylacyjnych

Ze względów geologiczno – górniczych prądy przekątne oraz prądy zależne występują praktycznie w każdej kopalni, powodując oddalenie się układu przewietrzania od najbardziej naturalnego układu połączeń szeregowych i równoległych. Przechodzenie z eksploatacją na coraz niższe poziomy, pozostawianie w niektórych sytuacjach starych poziomów, łączenie kopalń oraz wymogi techniczne powodują niemożność całkowitego zlikwidowania tego typu prądów powietrza.

Zależne prądy powietrza powodują zwiększenie strefy zagrożenia [12, 138, 145]. Rozważając zagrożenie pożarowe, a w szczególności wielkość strefy bezpośredniego zadymienia, można zauważyć, że dla sieci z prądami zależnymi strefa ta jest najczęściej znacznie większa niż w sieciach bez prądów zależnych. Na wielkość strefy zagrożenia wpływa również miejsce jego powstania. Aktualnie najczęstszym miejscem powstawania pożarów są ściany wraz z chodnikami przyścianowymi, wyrobiska przygotowawcze oraz komory funkcyjne. Jeżeli w sieci nie występują prądy zależne to strefa bezpośredniego zadymienia ustali się na pojedynczej drodze. Zakładając pożar w bocznicy 2 3 (rys. 4.1.1b) bocznicy zaliczonymi do strefy będą bocznic: 3 5, 5 6, 6 7. W przypadku pożaru w bocznicy 1 2 (rys. 4.1.2b sieć z prądami zależnymi w strefie zużytej) strefa bezpośredniego zadymienia obejmie bocznic: 2 5, 2 4, 4 6, 5 6. Jeszcze większa strefa zagrożenia powstanie w przypadku pożaru w prądzie grupowym powietrza świeżego, w szczególności w przypadku występowania licznych prądów zależnych w strefie świeżej. Nie sposób nie dostrzec wpływu prądów zależnych na rozwój zagrożenia spowodowanego wybuchem metanu lub pyłu węglowego. Dlatego występowanie prądów zależnych lub jego brak będzie miało znaczący wpływ na sytuowanie urządzeń zabezpieczających na dole kopalni.

Drażenie, a następnie utrzymanie każdego wyrobiska podziemnego w jego czasie istnienia niesie ze sobą pewien koszt ekonomiczny, związany z jego przewietrzaniem, nadzorem, utrzymaniem jego funkcjonalności. Uwaga ta dotyczy również wyrobisk w których przepływają prądy zależne. Dlatego likwidacja zbędnych wyrobisk może przynieść zysk ekonomiczny [138, 145].

Oprócz wymienionych wad, dowolne prądy zależne wykazują, jak każde z prądów przekątnych, możliwość odwrócenia kierunku przepływu powietrza w nich pod wpływem zaburzeń powstałych w sieci (zmiana oporu bocznic, zmiana charakterystyki wentylatora,

ognisko pożarowe) [79, 110]. Szczególnie w sieciach z kilkoma wentylatorami głównymi kierunek prądów zależnych pomiędzy podsieciami tych wentylatorów może ulegać zmianie, kiedy następuje wymiana wentylatorów lub zmiana ich charakterystyk (poprzez zmianę kąta nachylenia łopatek lub poprzez zmianę prędkości obrotowej). Dlatego czasami wymienione prądy stwarzają dodatkowe zagrożenia, w szczególności w przypadku, gdy możliwość odwrócenia kierunku nie jest brana pod uwagę przez osoby dozoru wentylacyjnego. Dla takiej sytuacji wyznaczone wcześniej drogi ucieczkowe mogą okazać się niewystarczającymi, zwłaszcza w przypadku odwrócenia kierunku prądu powietrza pod wpływem depresji wywołanej pożarem. W literaturze znane są opinie negatywnego wpływu prądów zależnych na bezpieczeństwo kopalni [13, 14, 6].

Prądy zależne, jak już wielokrotnie wspomniano utrudniają projektowanie przepływu powietrza w kopalni. Uwaga ta miała bardzo istotne znaczenie w czasach poprzedzających powszechne posługiwanie się techniką komputerową [35, 36].

Wydawałoby się więc, że prądy zależne niosą ze sobą same zagrożenia, jednakże teoria wentylacji wykazuje również pozytywne zastosowanie wymienionych prądów, w tym wykorzystując możliwość zmiany kierunku przepływu powietrza.

Analizując strefę bezpośredniego zadymienia można stwierdzić, że występowanie prądów zależnych, oprócz zwiększenia strefy, powoduje czasami skrócenie dróg ucieczkowych. Rozważmy następującą sytuację: pożar powstały w bocznicy 8 3 (rys. 4.1.2a) dla pracowników znajdujący się w bocznicy 3 5 oznacza, że najbliższym węzłem nie zadymionym jest węzeł 5. Po zlikwidowaniu bocznicy 4 5 (zużyty prąd zależny) najbliższym węzłem nie zadymionym okazuje się węzeł 6, do którego dojście zajmie więcej czasu. Można więc stwierdzić, że występowanie prądów zależnych zwiększa liczbę węzłów brzegowych strefy zadymienia, a poprzez to skraca czas potrzebny na dotarcie do najbliższego niezadymionego wyrobiska.

Prądy zależne pozwalają na rozrzedzenie gazów i dymów pożarowych oraz obniżenie ich temperatury dzięki dostarczeniu nie zadymionego oraz chłodniejszego powietrza do dróg przez które przepływają dymy. Takie działanie pozwala na zwiększenie prędkości poruszania się górników podczas ucieczki z miejsc zagrożonych [145].

Dzięki prądom zależnym możliwym staje się stosowanie metod mających przeciwdziałać rozprzestrzenianiu się skutków pożaru. Jedną z najbardziej znanych metod staje się wyrównanie potencjałów pomiędzy węzłem początkowym w_{pb} , a węzłem końcowym bocznicy w_{kb} za pomocą zmiany oporów bocznic sąsiednich. Równe wartości potencjałów w obydwu węzłach powodują brak przepływu powietrza w bocznicy co przyspiesza gaszenie

pożaru podziemnego. Metoda ta zaliczana jest do metod pasywnych gaszenia pożaru. Elementarnym jej przykładem może być zastosowanie warunku Czeczotta dla sieci prostej przekątnej.

Prądy zależne, a zwłaszcza zużyte prądy zależne pozwalają na skierowanie dymów pożarowych na wybrane przez kierownictwo wentylacji drogi prowadzące do szybów wydechowych, a poprzez to na zapewnienie niektórym pracownikom względnego bezpieczeństwa. Proponowane sposoby skierowania dymów na wybraną drogę poprzez zmianę oporów niektórych bocznic znane są jako tzw. rewersja lokalna.

Nie sposób stwierdzić braku znaczenia wyrobisk z prądami zależnymi ze względu na ich funkcje techniczne. Transport ludzi, materiałów, urobku w kopalniach o strukturze nie posiadającej prądów zależnych mógłby okazać się znacznie utrudniony.

W niniejszej pracy wykorzystana zostanie jeszcze jedna cecha sieci wentylacyjnych w których występują zużyte prądy zależne pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. Istnienie takich prądów pozwala na skierowanie określonej ilości powietrza na każdy z wentylatorów głównych. Przekierowanie powietrza może być uzyskane za pomocą odpowiedniego położenia i nastawy regulatorów. Jak zostanie pokazane w rozdziale piątym możliwość ta wpływa na koszty ekonomiczne pracy wentylatorów, dzięki uzyskaniu zbioru różnych punktów pracy układu sieć – wentylator dla każdego z wentylatorów spełniających wymogi zadanej ilości powietrza w odbiorach. Stwierdzenie to w znacznym stopniu dotyczy zagadnienia obliczeń rozplywu wymuszonego powietrza, a dokładniej jego optymalizacji w sensie energetycznym.

4.3. Metody wyznaczania prądów zależnych w kopalnianych sieciach wentylacyjnych

Schemat kanoniczny jest jednym ze sposobów przedstawiania kopalnianej sieci wentylacyjnej. Poprawnie narysowany schemat pozwala na podjęcie decyzji o charakterze bocznic. Dla małych sieci wentylacyjnych (do kilkudziesięciu bocznic), w szczególności płaskich, zadecydowanie o charakterze bocznic na podstawie schematu kanonicznego w zasadzie nie powinno stwarzać problemów. Jednakże w praktyce sieci wentylacyjne są znacznie bardziej złożone, a stwierdzenie charakteru bocznic nie jest oczywiste wyłącznie na

jego podstawie. Konieczna, ze względu na czytelność, wielkość schematu odgrywa też tutaj swoją rolę.

Równoważne w sensie zapisu struktury sieci wentylacyjnej są reprezentacje macierzowe sieci. Jednakże bezpośrednie analizowanie macierzy sąsiedztwa, incydencji węzłowo – bocznicowej czy cyklomatycznej rzadko pozwala na wyciągnięcie wniosków o charakterze prądu powietrza płynącego w bocznicach. Koniecznym staje się wykorzystanie metod bazujących na cyfrowym zapisie sieci, pozwalających na wykazanie charakteru prądu powietrza.

Zgodnie z definicją prądu zależnego, która zostanie tutaj przypomniana, tj. „prąd zależny – prąd powietrza łączący ze sobą dwa różne prądy powietrza świeżego lub dwa różne prądy powietrza zużytego” można stwierdzić, że prąd powietrza w bocznicach może posiadać charakter zależny jeżeli w węźle początkowym bocznicach następuje rozdzielanie lub mieszanie się strumieni powietrza (rys. 3.1.1b, 3.1.1c przedstawione w rozdziale 3), zaś w węźle końcowym bocznicach następuje łączenie lub mieszanie się strumieni powietrza (rys 3.1.1a, 3.1.1c). Jest to warunek konieczny, lecz nie wystarczający, co zostanie dalej pokazane. Dodatkowo węzeł początkowy oraz końcowy muszą znajdować się w tej samej strefie powietrza (świeżej lub zużytej).

W zapisie formalnym węzeł w_i typu łączenie spełnia zależność:

$$\text{indeg } w_i \geq 2, \quad \text{outdeg } w_i = 1 \quad [4.3.1]$$

węzeł w_i typu rozdzielanie spełnia zależność:

$$\text{indeg } w_i = 1, \quad \text{outdeg } w_i \geq 2 \quad [4.3.2]$$

zaś węzeł w_i typu mieszanie spełnia zależność:

$$\text{indeg } w_i \geq 2, \quad \text{outdeg } w_i \geq 2 \quad [4.3.3]$$

Poza wymienionymi przypadkami, w sieciach wentylacyjnych mogą występować półwęzły oraz węzły wiszące, co można zapisać, dla półwęzła:

$$\text{indeg } w_i = 1, \quad \text{outdeg } w_i = 1 \quad [4.3.4]$$

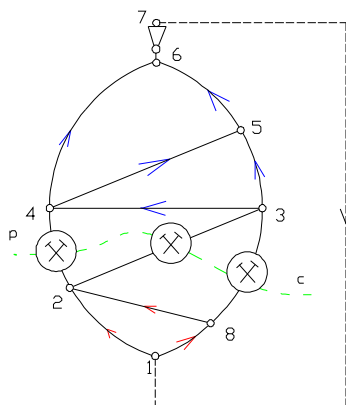
oraz dla węzła wiszącego:

$$\text{indeg } w_i = 0, \quad \text{lub } \text{outdeg } w_i = 0 \quad [4.3.5]$$

W sieciach wentylacyjnych bez węzłów wiszących występowanie węzłów o stopniach wejściowych lub wyjściowych równych zero jest niemożliwe.

Jeżeli w sieciach wentylacyjnych w strefie świeżej występuje węzeł typu łączenie lub mieszanie to w tej strefie powinien występować prąd zależny. Natomiast jeżeli w strefie zużytej występuje węzeł typu rozdzielanie lub mieszanie to w tej strefie również powinien

Oczywiście, aby możliwym było określenie charakteru węzła, koniecznym jest wcześniejsze nadanie kierunków przepływu powietrza w sieci wentylacyjnej. Znajomość kierunków możliwa jest dzięki uprzednim obliczeniom rozprężu powietrza lub może być uzyskana na drodze pomiarów dołowych. Na rysunku 4.3.1. przedstawiona została sieć wentylacyjna z prądami zależnymi, na jej podstawie otrzymano skróconą macierz przejść, którą przedstawiono w tablicy 4.3.1.



Rys. 4.3.1. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej A z prądami zależnymi

Tablica 4.3.1

Skrócona macierz przejść dla sieci wentylacyjnej A z rysunku 4.3.1

Węzeł	Węzły sąsiednie	Stopień wejścia węzła w_i	Stopień wyjścia węzła w_i	Typ węzła
1	-7, 2, 8	1	2	rozdzielanie
2	-1, -8, 3, 4	2	2	mieszanie
3	-2, -8, 4, 5	2	2	mieszanie
4	-2, -3, 5, 6	2	2	mieszanie
5	-3, -4, 6	2	1	łączenie
6	-4, -5, 7	2	1	łączenie
7	-6, 1	1	1	półwęzeł
8	-1, 2, 3	1	2	rozdzielanie

Rozpatrując schemat kanoniczny przedstawiony na rysunku 4.3.1., można stwierdzić, że prądami zależnymi są prądy w bocznicach 2 8 (prąd zależny świeży) 3 4, 4 5 (prądy zależne zużyte).

Analizując tablicę 4.3.1 można zauważyć węzeł 2 znajdujący się w strefie powietrza świeżego posiada charakter mieszania, więc w strefie tej powinien występować prąd zależny. W strefie zużytej węzły 3 oraz 4 są węzłami typu mieszanie, więc i w tej strefie istnieją prądy zależne. Dodatkowo warto rozważyć charakter prądów w bocznicach 3 5 oraz 4 6, pomimo że węzłami początkowymi są węzły typu mieszanie, zaś węzły końcowe bocznic posiadają charakter łączenia to trudno zaklasyfikować te prądy jako zależne.

Dla dowolnej sieci wentylacyjnej może zajść jeden z czterech przypadków:

- w strefie świeżej występują wyłącznie węzły typu rozdzielanie lub półwęzły, a w strefie zużytej występują wyłącznie węzły typu łączenie lub półwęzły. Dla tego przypadku prądy zależne nie istnieją,
- w strefie świeżej występują węzły typu łączenie lub mieszanie, a w strefie zużytej występują wyłącznie węzły typu łączenie lub półwęzły. W sieci wentylacyjnej istnieją świeże prądy zależne;
- w strefie świeżej występują wyłącznie węzły typu rozdzielanie lub półwęzły, a w strefie zużytej występują węzły typu rozdzielanie lub mieszanie. W sieci wentylacyjnej istnieją zużyte prądy zależne;
- w strefie świeżej występują węzły typu łączenie lub mieszanie, a w strefie zużytej występują węzły typu rozdzielanie lub mieszanie. W sieci wentylacyjnej istnieją zarówno świeże jak i zużyte prądy zależne

Rozważając pierwszy przypadek, po odrzuceniu bocznic $p - c$ (należących do odbiorów powietrza) ze struktury sieci wentylacyjnej, powstała sieć ma charakter drzewa w sensie teorii grafów. Po dodatkowym odrzuceniu bocznic zamykającej powstaje las składający się z dwóch drzew. Drzewo strefy świeżej posiada $l_{pc}+1$ węzłów o stopniu 1, którymi są węzeł początkowy sieci w_{ps} oraz węzły początkowe bocznic należących do $p - c$. Drzewo strefy zużytej również posiada $l_{pc}+1$ węzłów o stopniu 1 którymi są węzeł końcowy sieci w_{ks} oraz węzły końcowe bocznic należących do $p - c$. Ponieważ każda droga przechodząca przez węzeł początkowy sieci, bocznicę odbioru, węzeł końcowy sieci oraz bocznicę zamykającą jest cyklem, więc usunięcie wszystkich bocznic należących do przekroju całkowitego zmniejsza liczbę cykli o l_{pc} . Dla tego przypadku zachodzi więc następująca zależność:

$$v = I_{pc} \quad [4.3.4]$$

Dla pozostałych przypadków odrzucenie bocznic należących do przekroju całkowitego nie powoduje powstanie drzewa. Istnieją wtedy cykle wewnętrzne, w skład których wchodzi prądy zależne. Zachodzi więc następująca zależność:

$$v \geq I_{pc} \quad [4.3.5]$$

Inaczej mówiąc każdy prąd zależny powoduje powstanie cyklu wewnętrznego w strefie w której prąd taki występuje.

Możliwym jest, jak wspomniano wcześniej zaliczenie bocznic oraz węzłów do strefy świeżej lub zużytej, wtedy dla każdej z tych stref można obliczyć liczbę cyklomatyczną korzystając ze wzorów 3.3.1 (sieć otwarta) lub 3.3.2 (sieć zamknięta). Jeżeli liczba cyklomatyczna dla badanej strefy wynosi 0, to wtedy w tej strefie nie występują prądy zależne. Obliczona liczba cyklomatyczna świadczyłaby w sposób przybliżony o liczbie prądów zależnych w rozpatrywanych strefach. Należałoby jednak dokonać kolejnych badań mających na celu sprawdzenie korespondowania liczby cyklomatycznej strefy z liczbą prądów zależnych.

Dla sieci z rysunku 4.3.1. w strefie świeżej występują trzy bocznic oraz trzy węzły 1, 2, 8. W strefie zużytej istnieje sześć bocznic oraz pięć węzłów 3, 4, 5, 6, 7. Korzystając ze wzoru 3.3.2 uzyskuje się:

$$v_{sw} = 3 - 3 + 1 = 1$$

$$v_{zu} = 6 - 5 + 1 = 2$$

Wskazuje to na występowanie oczek wewnętrznych, a poprzez to prądów zależnych zarówno w strefie świeżej, jak i w strefie zużytej. Dla rozważanego przypadku zachodzi równość pomiędzy liczbą prądów zależnych, a liczbą cyklomatyczną strefy dla obydwu stref powietrza.

Bocznic z prądami zależnymi są zaliczane do prądów przekątnych. Możliwe jest więc poszukiwanie prądów zależnych poprzez badanie charakteru bocznic (normalnego lub przekątnego) osobno dla każdej ze stref powietrza. Uprzednie rozdzielenie węzłów oraz bocznic do dwóch stref powinno ułatwić decydowanie o charakterze bocznic.

Szczególnym rodzajem prądów zależnych są zużyte prądy zależne pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. Występowania tych prądów można stwierdzić na podstawie tabeli osiągalności lub tabeli dostępności. Tabele te mogą zostać uzyskane poprzez podnoszenie do kolejnych potęg macierzy przejść po wyzerowaniu komórek z ujemnymi wartościami oraz odrzuceniu bocznic zamykającej. Zawartość komórki i,j w uzyskanych macierzach oznacza liczbę dróg od węzła i -tego do węzła j -tego o długości równej potędze

macierzy. Sumując wszystkie uzyskane macierze niezerowe otrzymuje się macierz w której wartości poszczególnych komórek oznaczają liczbę wszystkich dróg od węzła o numerze równym numerowi wiersza do węzła o numerze równym numerowi kolumny. Dla sieci w których występuje do kilkunastu węzłów nawet ręczne obliczenia nie powinny sprawiać problemu. W kopalnianych sieciach wentylacyjnych, gdzie liczba węzłów czasami przewyższa 500, potęgowanie macierzy o tak wielkich wymiarach staje się czasochłonne.

W pracy [74] został zaproponowany sposób wyznaczania tabeli dostępności oraz osiągalności na podstawie podziału zbioru węzłów na warstwy. Algorytm dzielący zbiór węzłów na warstwy wykorzystuje relacje starszeństwa pomiędzy węzłami (przy uprzednim odrzuceniu bocznic zamykającej) oraz bazuje na skróconej macierzy przejść. Następnie tworzona jest macierz przejść w której wiersze oznaczające węzły są uszeregowane od najmłodszego (należącego do warstwy o najwyższym numerze) do najstarszego (należącego do warstwy pierwszej). Dla węzła znajdującego się w ostatniej warstwie wszystkie elementy wiersza macierzy przyjmują wartość 0, wynika to z faktu odrzucenia bocznic zamykającej. Kolejne wiersze macierzy zawsze zawierają elementy o wartościach różnych od zera. Dla tak uszeregowanej macierzy możliwe staje się wyznaczenie macierzy osiągalności na podstawie wzoru:

$$l_i = a_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} * l_j \quad [4.3.6]$$

gdzie:

l_i - i-ty wiersz macierzy osiągalności L ,

a_i - i-ty wiersz pełnej macierzy przejść A ,

a_{ij} - element pełnej macierzy przejść A ,

symbol + oznacza dodawanie całych wierszy odpowiednich macierzy,

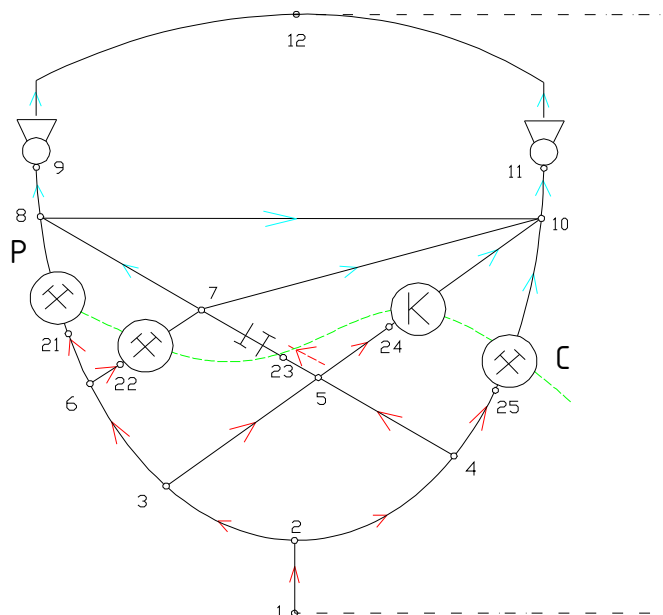
symbol * oznacza mnożenia elementu a_{ij} przez wiersz l_j macierzy L .

Postępowanie rozpoczyna się od węzła najmłodszego (węzeł końcowy sieci w_{ks}) należącego do ostatniej warstwy, zaś kończy się na węźle najstarszym (węzeł początkowy sieci w_{ps}). Można więc wskazać na następujący sposób postępowania przy wyznaczaniu macierzy dostępności:

- zapis struktury sieci wentylacyjnej w postaci macierzy przejść,
- likwidacja bocznic zamykającej oraz uaktualnienie macierzy przejść,
- podział zbioru węzłów na warstwy,
- uszeregowanie węzłów według numerów warstw do których należą,

- wyznaczenie macierzy dostępności (na podstawie wzoru 4.3.6).

Dla sieci pokazanej na rysunku 4.3.2. zostanie pokazany sposób postępowanie przy wyznaczaniu macierzy dostępności.



Rys. 4.3.2. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej z użytymi prądami zależnymi łączącymi podsieci wentylatorów.

Tablica 4.3.2

Macierz przejść dla sieci wentylacyjnej z rysunku 4.3.2

w_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	21	22	23	24	25
w_i																	
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	-1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
6	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-1	-1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	1	0	0	-1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	-1	-1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Po usunięciu bocznicy zamykającej 12 1 (komórki przekreślone, nadanie wartości 0 tym komórkom), do warstwy pierwszej z powodu braku poprzedników (wszystkie komórki w wierszu posiadają wartość nieujemną) został zaliczony węzeł 1. Następnie zerowane są elementy kolumny odpowiadającej węzłowi 1 (zaznaczone kolorem niebieskim), tworzona warstwa druga, do której zaliczony zostaje węzeł 2 (po wyzerowaniu elementów kolumny węzła 1, węzeł 2 nie posiada poprzedników). Dalej zerowana jest kolumna 2 (kolor czerwony), tworzona warstwa trzecia do której zaliczane są węzły 3 oraz 4, zerowane kolumny 3 i 4 (kolor zielony). Procedura poszukiwania wierszy o elementach nieujemnych, zaliczania węzłów do kolejnych warstw, a następnie nadawania elementom kolumn odpowiadającym tym węzłom wartości 0 zostaje zakończona w momencie braku w macierzy wyrazów niezerowych. Wyniki przynależności węzłów do kolejnych warstw zostały przedstawione w tablicy 4.3.3.

Tablica 4.3.3

Podział węzłów na warstwy z sieci na rysunku 4.3.2

Numer warstwy	Węzły zaliczone do warstwy
1	1
2	2
3	3, 4
4	5, 6, 25
5	21, 22, 23, 24
6	7
7	8
8	9, 10
9	11
10	12

Następnie węzły zostały uszeregowane w macierzy przejść według przynależności do poszczególnych warstw, rozpoczynając od warstwy 10, a kończąc na warstwie 1. Elementom macierzy o wartościach ujemnych nadano wartość 0. Uzyskana macierz przejść została przedstawiona w tabeli 4.3.4.

Dla uporządkowanej macierzy przejść wartości elementów znajdujące się powyżej głównej przekątnej przyjmują wartość zero. Następnie przy wykorzystaniu wzoru 4.3.6 została wyznaczona macierz dostępności.

Tablica 4.3.4

Uporządkowana według starszeństwa macierz przejść dla sieci z rys. 4.3.2.

w_j	12	11	9	10	8	7	21	22	23	24	5	6	25	3	4	2	1
w_i																	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Tablica 4.3.5

Macierz dostępności dla sieci z rys. 4.3.2.

w_j	12	11	9	10	8	7	21	22	23	24	5	6	25	3	4	2	1
w_i																	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	3	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	3	1	3	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	5	3	2	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	6	3	6	3	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
4	5	4	1	4	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
2	14	10	4	10	4	3	1	1	2	2	2	1	1	1	1	0	0
1	14	10	4	10	4	3	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	0

Uzyskana macierz dostępności w prosty sposób może być przekształcona w macierz osiągalności. Przekształcenie to odbywa się poprzez nadanie elementom o wartościach dodatnich wartości 1. Osiągnięcie przez dany element wartości 1 oznaczałoby występowanie drogi lub dróg pomiędzy węzłami w_i oraz w_j . Liczba dróg odpowiadałaby wartości danego elementu w macierzy dostępności.

Analizując macierze dostępności oraz osiągalności łatwo stwierdzić występowanie zużytych prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych. W tym celu do zbioru węzłów początkowych zaliczane są wszystkie węzły końcowe bocznic należących do przekroju całkowitego, zaś do zbioru węzłów końcowych zaliczane są wszystkie węzły początkowe bocznic zawierających wentylatory główne. Jeżeli dla każdego z węzłów należących do zbioru pierwszego istnieje osiągalność jednego i tylko jednego węzła ze zbioru drugiego, wtedy w rozpatrywanej sieci prądy „międzysystemowe” nie istnieją. Jeżeli dla dowolnego z węzłów należących do zbioru pierwszego istnieje osiągalność przynajmniej dwóch węzłów ze zbioru drugiego, wtedy w rozpatrywanej sieci prądy „międzysystemowe” występują.

W rozpatrywanym przykładzie zbiór węzłów końcowych bocznic należących do przekroju całkowitego tworzą węzły {7, 8, 10} (zaznaczone kolorem czerwonym wiersze), natomiast zbiór węzłów początkowych bocznic z wentylatorami {9, 11} (zaznaczone kolorem zielonym kolumny). Analizując wartości komórek na przecięciach się wierszy z kolumnami (kolor niebieski) stwierdzono o występowanie dróg z węzłów 7 oraz 8 zarówno do węzła 9 jak i 11 (wartości odpowiednich komórek są różne od zera). Fakt ten wskazuje na to, że w badanej sieci istnieją zużyte prądy zależne pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych.

Kolejna metoda pozwalająca na sprawdzenie czy w sieci wentylacyjnej występują prądy „międzysystemowe” bazuje na rozsypaniu się grafu spójnego reprezentującego sieć na zbiór grafów niespójnych. W tym celu dokonuje się usunięcia z zapisu strukturalnego sieci bocznic należących do przekroju całkowitego, bocznic zawierających wentylatory oraz bocznic zamykających. Taka czynność zawsze powoduje powstanie podgrafu strefy świeżej oraz podgrafu lub podgrafów strefy zużytej. Dla sieci zawierającej l_w wentylatorów można rozróżnić następujące przypadki:

- po usunięciu wspomnianych bocznic powstają tylko dwa podgrafy spójne, jeden dla strefy świeżej drugi dla strefy zużytej. Można wtedy wnioskować o występowaniu prądów „międzysystemowych” łączących wszystkie podsieci l_w wentylatorów pomiędzy sobą,

- po usunięciu wspomnianych bocznic powstają l_w+1 podgrafów spójnych, w tym jeden dla strefy świeżej oraz l_w dla podsieci wentylatorów głównych. Można wtedy wnioskować o braku występowania prądów „międzysystemowych”,
- po usunięciu wspomnianych bocznic powstaje najwyżej l_w , lecz nie mniej niż 3 podgrafów spójnych. Jest to sytuacja pośrednia pomiędzy poprzednimi, niektóre lecz nie wszystkie, podsieci wentylatorów głównych są połączone ze sobą prądami „międzysystemowymi”

Metoda pozwala nie tylko na wykrycie prądów „międzysystemowych” lecz również w przypadku sieci z liczbą wentylatorów głównych większą niż dwa, na wykazanie które z podsieci są ze sobą połączone. Jako szczególnie interesujący można podać przykład sieci z czterema wentylatorami głównymi. Podsieci wentylatorów I oraz II są ze sobą połączone, podobnie jak podsieci wentylatorów III oraz IV. Możliwe wtedy jest kierowanie powietrzem wewnątrz wspólnej podsieci wentylatorów I oraz II, lecz nie można „przesuwać” powietrza do drugiej wspólnej podsieci wentylatorów III oraz IV. Zagadnienie badania struktury sieci wentylacyjnej pod tym kątem może okazać się istotne przy prowadzeniu energooszczędnej gospodarki powietrzem, jak również ze względu na bezpieczeństwo pracy.

5. Opracowanie metod obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne, między podsieciami wentylatorów głównych, uwzględniających minimalizację mocy użytecznej wentylatorów

5.1. Rozplyw wymuszony jako zagadnienie programowania matematycznego

Problem obliczania wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych sieciach wentylacyjnych polega na podejmowaniu decyzji dotyczącej rozmieszczenia oraz nastawy regulatorów. W przypadkach dotyczących większości rzeczywistych sieci wentylacyjnych można wnioskować o nieskończonej liczbie możliwych rozwiązań, z których każde spełnia wymagania zadanego rozplywu wymuszonego powietrza. Poszczególne rozwiązania będą różnić się od siebie uzyskanymi parametrami wyjściowymi (takimi jak: wydatki powietrza oraz spadki naporów w niektórych bocznicach, wyznaczonymi punktami pracy wentylatorów głównych oraz pomocniczych, mocą użyteczną tych wentylatorów). Wszystkie możliwe do zaakceptowania rozwiązania (spełniające warunki ograniczające) tworzą w teorii programowania matematycznego tzw. zbiór dopuszczalny [44, 66, 93, 94,]. Znane są również przypadki, w których zbiór warunków ograniczających jest zbiorem pustym. Taki typ optymalizacji nazwany jest optymalizacją bez ograniczeń. Z drugiej strony istnieją przypadki zagadnienia optymalizacyjnego w których nie istnieje nawet rozwiązanie dopuszczalne problemu (problemy sprzeczne), zbiór spełniający warunki ograniczające jest wtedy zbiorem pustym.

Istnienie rozwiązania optymalnego pociąga za sobą istnienie rozwiązania dopuszczalnego. Natomiast niesprzeczność problemu nie oznacza istnienia rozwiązania optymalnego [66]. Rozważany problem posiada nieskończony zbiór rozwiązań dopuszczalnych, z których można wybrać rozwiązanie optymalne ze względu na zadane kryterium. W sposób formalny zależność można zapisać w następującej formie:

$$r_{opt} \in \{r_{dop}\} \quad [5.1.1]$$

gdzie:

r_{opt} – rozwiązanie optymalne,

r_{dop} – rozwiązanie dopuszczalne

Możliwość podjęcia wielu różnych decyzji dopuszczalnych stawia przed decydentem konieczność dążenia do podjęcia najlepszej, czyli optymalnej decyzji.

Decydent przed podjęciem decyzji może stanąć w różnych, czasami skrajnych sytuacjach. Jedną ze skrajnych sytuacji jest niepewność efektu podjętych decyzji. W warunkach poważnych, nagle występujących zagrożeń górniczych wymagających szybkiego działania można zaliczyć proces podjęcia decyzji do działania w warunkach niepewności. Istotne wtedy jest doświadczenie decydenta lub decydentów poparte uczestnictwem w podobnych sytuacyjnie akcjach. Drugą skrajnością jest podejmowanie decyzji o efekcie której decydent posiada pełną pewność [136]. Niniejsze zagadnienie kwalifikuje się do drugiej grupy, zarówno ze względu na możliwość dokonania wielowariantowych obliczeń rozplywu wymuszonego poprzedzających podjęcie decyzji, jak również z powodu braku konieczności podejmowania natychmiastowej decyzji.

Ze względu na konieczność podjęcia decyzji optymalnej potrzebna jest znajomość kryterium rozstrzygającego o optymalności tejże decyzji. Kryteriami mogą być np.: zużycie materiałów, koszty, zyski, stopień bezpieczeństwa. Kryterium takie określone za pomocą pewnej funkcji matematycznej nosi nazwę funkcji celu. Oczywiście w niektórych przypadkach będzie się dążyć do minimalizacji, zaś w innych do maksymalizacji funkcji celu. Zależać to będzie od interpretacji ekonomicznej lub społecznej zagadnienia.

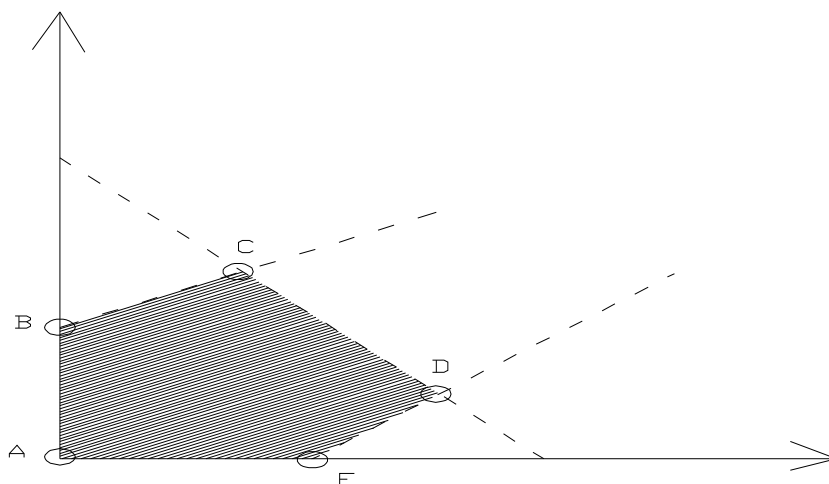
W przypadku, gdy zarówno funkcja celu jak i warunki graniczne określające zbiór dopuszczalny dadzą się przedstawić za pomocą pewnych funkcji, możliwym staje się wykorzystanie algorytmów programowania matematycznego przy podejmowaniu decyzji optymalnej.

Programowanie matematyczne można podzielić ze względu na charakter, występujących w funkcji celu i warunkach ograniczających, równań i nierówności na:

- programowanie liniowe,
- programowanie nieliniowe

Programowanie liniowe jest najprostszym oraz najszerzej stosowanym działem programowania matematycznego [66, 69, 93, 94]. Dla programowania liniowego funkcja celu (maksymalizowana lub minimalizowana) jest funkcją liniową i - zmiennych. Także funkcje określające zbiór rozwiązań dopuszczalnych są przedstawione za pomocą równań lub nierówności liniowych. Dla dwóch zmiennych decyzyjnych możliwe jest zastosowanie metody graficznej, jednakże dla większej liczby zmiennych najczęściej stosowaną metodą jest prymalna metoda simpleks [66, 69]. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych zagadnienia

programowania liniowego tworzy wielościan wypukły ograniczony. W metodzie simpleks poszukiwanie optimum (maksimum lub minimum) funkcji celu będzie polegać na badaniu jej wartości dla kolejnych wierzchołków tworzących wspomniany wielościan. Na rysunku 5.1.1 przedstawiono przykład zagadnienia programowania liniowego dla dwóch zmiennych niezależnych.



Rys. 5.1.1. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych w programowaniu liniowym

Na rysunku 5.1.1. liniami przerywanymi zostały zaznaczone liniowe warunki ograniczające, wielokąt ABCDE określa zbiór rozwiązań dopuszczalnych, aby znaleźć rozwiązanie optymalne wystarczy zbadać wartość funkcji celu w punktach A, B, C, D i E. W punkcie w którym wartość funkcji celu jest minimalna (lub maksymalna) istnieje rozwiązanie optymalne.

W przedstawionym powyżej przykładzie jako warunki ograniczające zostały wybrane nierówności. Dla zagadnienia obliczeń rozpyły wymuszonego warunki ograniczające mają charakter równań, dlatego zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest powłoką wielościanu wypukłego (na rys. 5.1.1. oznaczałoby to linię zamkniętą przechodzącą kolejno przez punkty A B C D E A).

Chociaż tytułowe zagadnienie niniejsze pracy nie jest zaliczane do programowania liniowego, to pewna część postępowania (wybór kierunku poprawy mocy wentylatorów) wymagała podania powyższych informacji. Mianowicie, dla projektowanych kopalnianych sieci wentylacyjnych zawierających prądy zależne między podsieciami wentylatorów głównych, elementarna zmiana wydatku powietrza na i -tym wentylatorze może spowodować w różnym stopniu elementarne zmiany wydatków na pozostałych wentylatorach

głównych, co z kolei przyczynia się do różnych elementarnych zmian mocy całkowitej wentylatorów. Ze względu na charakter funkcji ograniczeń i celu, układ równań granicznych oraz funkcji celu powstały po zróżniczkowaniu względem wydatku powietrza na wentylatorze posiada charakter liniowy (przy znanym aktualnym rozwiązaniu rozplywu wymuszonego). Optymalny kierunek poprawiający wartość funkcji celu będzie więc zgodnie z zasadami programowania liniowego przechodził przez jeden z wierzchołków (wierzchołkiem uznany zostaje punkt odpowiadający sytuacji, gdy elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze głównym i – tym w całości przeniosła się na wentylator j – ty). Dlatego w sieci wentylacyjnej, w której występuje l_w wentylatorów głównych, wystarczy sprawdzić $l_w \cdot (l_w - 1)$ wpływów elementarnych zmian wydatku powietrza na wentylatorach głównych na sumaryczną moc wentylatorów.

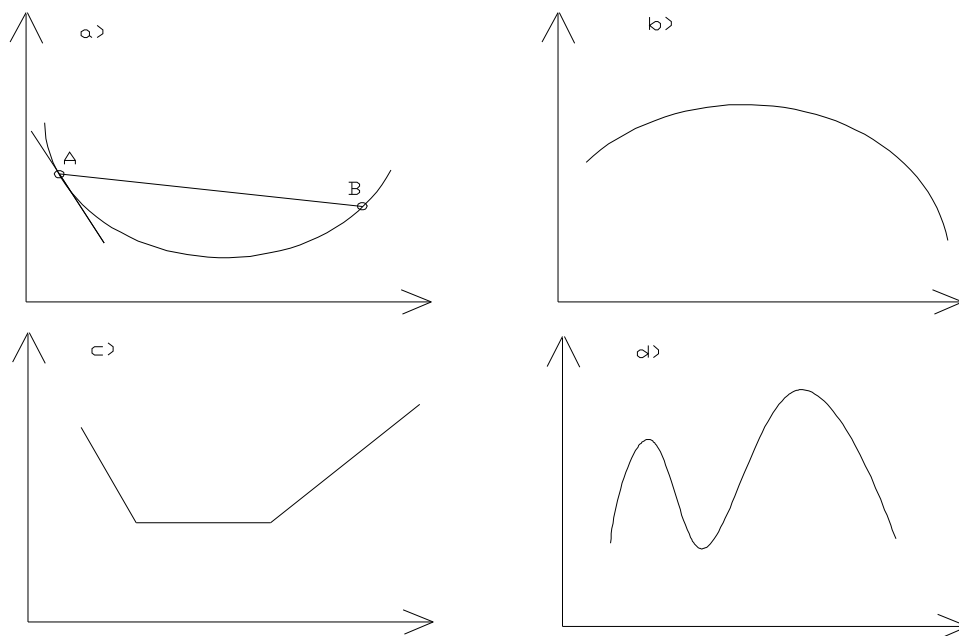
Konieczność zastosowania aparatu programowania nieliniowego występuje, gdy zachodzi jedna z następujących sytuacji [93]:

- funkcja celu jest funkcją nieliniową, zaś warunki ograniczające mają charakter liniowy,
- funkcja celu jest funkcją liniową, zaś warunki ograniczające posiadają charakter nieliniowy,
- zarówno funkcja celu, jak i warunki ograniczające są funkcjami nieliniowymi (wystarczającym jest, aby tylko część warunków ograniczających była funkcjami nieliniowymi).

Kryterium optymalizacyjnym w niniejszej pracy jest minimalizacja mocy użytecznej wentylatorów. Moc użyteczna wentylatorów, w ogólnym przypadku zagadnienia rozplywu wymuszonego najczęściej jest iloczynem dwóch zmiennych, dlatego funkcja celu posiada charakter nieliniowy. Szczególnym przypadkiem są sieci wentylacyjne, w których nie istnieją prądy zależne między podsieciami wentylatorów głównych, która to właściwość powoduje stałość wydatku powietrza na każdym z wentylatorów głównych. Wynika to z powodu założenia stałych wydatków powietrza w bocznicach odbioru. Warunki ograniczające wynikające z prawa równowagi dla węzłów sieci wentylacyjnej posiadają charakter liniowy, natomiast warunki wynikające z prawa równowagi dla cykli są funkcjami nieliniowymi. Zachodzi więc trzecia z opisanych wcześniej sytuacji.

Warunkiem koniecznym do zaliczenia problemu do zagadnienia programowania nieliniowego był nieliniowy charakter funkcji celu lub warunków ograniczających, jednakże poziom trudności poszukiwania rozwiązania optymalnego będzie zależał od charakteru wymienionych funkcji. Szczególnie istotnym staje się wykazanie ewentualnej wypukłości

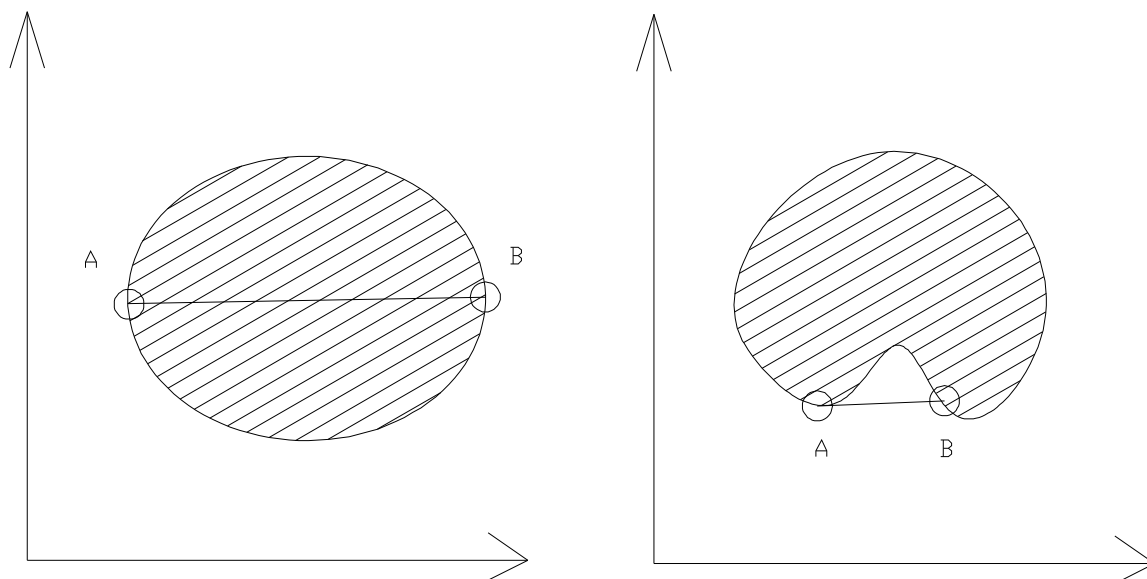
(wklęsłości) tychże funkcji. Jeżeli wszystkie funkcje (celu oraz ograniczające) są funkcjami wypukłymi (wklęsłymi) możliwym staje się wykorzystanie programowania wypukłego w celu znalezienia rozwiązania optymalnego. Przy braku wypukłości (wklęsłości) funkcji poszukiwanie minimum (maksimum) funkcji celu staje się znacznie utrudnione, co więcej w pewnych przypadkach brak jest algorytmów pozwalających na znalezienie minimum globalnego dla ogólnego przypadku. Przykłady funkcji ze względu na wypukłość lub jej brak zostały pokazane na rys. 5.1.2.



Rys. 5.1.2. Rodzaje funkcji: a) funkcja ściśle wypukła, b) funkcja ściśle wklęsła, c) funkcja wypukła, d) funkcja nie będąca ani funkcją wklęsłą, ani funkcją wypukłą

Graficzna interpretacja funkcji ściśle wypukłej przedstawionej na rysunku 5.1.2a wskazuje, że dla dowolnych punktów A oraz B należących do wykresu funkcji, odcinek je łączący znajduje się wyżej od łuku tego wykresu łączącego punkty A oraz B. Styczna do wykresu funkcji jest natomiast położona niżej od wykresu funkcji. Dla takiego typu funkcji istnieje jedno minimum lokalne będące jednocześnie minimum globalnym. Dla niektórych funkcji minimum globalne może znajdować się również na granicy badanego przedziału. Funkcja przedstawiona na rysunku 5.1.2c mimo, że jest funkcją wypukłą, nie jest funkcją ściśle wypukłą. Przedstawiona funkcja posiada nieskończenie wiele minimów. Funkcja 5.1.2d posiada w pokazanym przedziale, kilka maksimum (minimów) lokalnych, z których jeden jest maksimum globalnym. Dla tego typu funkcji metody poszukiwania maksimum globalnego są słabo rozpoznane dla ogólnego przypadku.

Warunki ograniczające, jak już wspomniano, tworzą zbiór rozwiązań dopuszczalnych. Ze względu na charakter warunków ograniczających pod względem ich wypukłości, zbiór ten może być zbiorem wypukłym. Przy wykorzystaniu aparatu matematycznego programowania wypukłego koniecznym jest wykazanie, że zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest zbiorem wypukłym. Przykład płaskiego zbioru wypukłego oraz zbioru nie będącego zbiorem wypukłym został pokazany na rysunku 5.1.3.



Rys. 5.1.3. Rodzaje zbiorów: a) zbiór wypukły, b) zbiór nie będący zbiorem wypukłym

Dowolne punkty A oraz B należące do zbioru rozwiązań dopuszczalnych (zakreskowanego na rysunku 5.1.3) zostały połączone odcinkiem. Jeżeli zbiór jest zbiorem wypukłym (rys. 5.1.3a) to dowolny punkt należący do odcinka $|AB|$ należy również do tego zbioru. W przeciwnym przypadku zbiór nie jest zbiorem wypukłym (rys. 5.1.3b).

Dla funkcji celu będącej funkcją wypukłą, lecz określonej na zbiorze rozwiązań dopuszczalnych nie będącym zbiorem wypukłym, zastosowanie metod programowania wypukłego nie daje rozwiązań.

Dlatego w kolejnym podrozdziale zostanie sprawdzony charakter funkcji celu oraz zbioru rozwiązań dopuszczalnych dla zagadnienia obliczenia rozprężu wymuszonego w projektowanych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych przy przyjętym kryterium minimalizacji mocy wentylatorów.

5.2. Badanie kształtu funkcji mocy w zagadnieniach rozplywu wymuszonego w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych

W zagadnieniach rozplywu wymuszonego w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych istotną rolę pełni ustalenie charakterów funkcji celu oraz funkcji określających zbiór warunków ograniczających. Dla wyżej wymienionych funkcji należy wykazać ich ewentualną wypukłość, wklęsłość lub brak tych cech. Przed rozwiązaniem problemu poszukiwania minimum funkcji, należy wpięrw powyższe zadanie zakwalifikować do jednej z grup programowania matematycznego, aby w dalszych etapach rozwiązywania zagadnienia możliwym było wykorzystanie konkretnych algorytmów znanych w literaturze.

Zagadnienie ma następującą postać, zminimalizować funkcję:

$$N_u = \sum_{i=1}^{l_w} H_{gi} \cdot V_i = H_{g1} \cdot V_1 + H_{g2} \cdot V_2 + \dots + H_{gn} \cdot V_n = \min, \quad [5.2.1]$$

przy następujących warunkach ograniczających wynikających z praw równowagi:

$$H_{gi} + H_{pi} = \sum_{i \in d} R_i \cdot (V_i)^2 = R_1 \cdot (V_1)^2 + R_2 \cdot (V_2)^2 + \dots + R_i \cdot (V_i)^2, \quad d = 1, 2, \dots, n \quad [5.2.2]$$

dla każdej z dróg niezależnych przechodzących przez bocznice zamykającą. Warunek [5.2.2] wynika z prawa równowagi dla oczek zewnętrznych w sieciach wentylacyjnych spełniających warunek acykliczności. Natomiast dla każdego z węzłów niezależnych prawdziwy jest następujący warunek:

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \cdot V_i = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad [5.2.3]$$

Jeżeli zadane wydatki, zostały uwzględnione dla wszystkich bocznice należących do przekroju całkowitego przechodzącego przez odbiory powietrza (do którego to przekroju oprócz bocznice – odbiorów powietrza zaliczane są również bocznice ze stratami powietrza), to suma tych wydatków jest równa sumie wydatków przechodzących przez wentylatory głównego przewietrzania.

Opory wyrobisk, tam regulacyjnych, spiętrzenia wentylatorów głównych i pomocniczych oraz wydatki powietrza w zagadnieniu obliczania rozplywu wymuszonego (nie precyzując rodzaju podmetody stosowanej regulacji) przyjmują wartości nieujemne:

$$V_i, H_i, R_i \geq 0. \quad [5.2.4]$$

Ze względu na nieliniowość funkcji celu [5.2.1] oraz warunku ograniczającego [5.2.2], przedstawione zagadnienie nie jest zadaniem programowania liniowego. W dalszej kolejności należy sprawdzić, czy problem powyższy jest zagadnieniem programowania wypukłego.

Twierdzenie 1:

Jeśli funkcja celu jest funkcją wypukłą na zbiorze wypukłym D, to funkcja celu posiada co najwyżej jedno minimum lokalne. Jeżeli istnieje takie minimum, to jest ono minimum globalnym i jest osiągane w zbiorze wypukłym D.

Twierdzenie 2

Niech D będzie zbiorem punktów, które spełniają warunki ograniczeń oraz ograniczenia te są funkcjami wypukłymi to D jest zbiorem wypukłym.

W celu udowodnienia, że zbiór warunków ograniczających jest wypukły, należy udowodnić że każdy z warunków ograniczających jest funkcją wypukłą. Na początku zostanie podany dowód, że funkcja [5.2.2] jest funkcją wypukłą, w tym celu wprowadza się pojęcie gradientu funkcji.

Twierdzenie 3

Jeżeli funkcja celu i jej pierwsze pochodne cząstkowe są funkcjami ciągłymi w pewnym zbiorze, to dla każdego punktu w tym zbiorze można określić wektor kolumnowy $\nabla F(X)$ zwany gradientem w punkcie X^0 .

$$\nabla F(X) = \begin{bmatrix} \frac{dF(X^0)}{dX_1} \\ \frac{dF(X^0)}{dX_2} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dF(X^0)}{dX_i} \end{bmatrix} \quad [5.2.5]$$

Funkcja

$$F(V) = R_i \cdot (V_i)^2,$$

jest funkcją ciągłą.

Jej pochodne cząstkowe ze względu na zmienne V_i wynoszą:

$$\frac{dF(V)}{d(V_i)} = 2 \cdot R_i \cdot V_i,$$

które również są funkcjami ciągłymi.

Na podstawie twierdzenia 3 można zapisać wektor kolumnowy funkcji,

$$\nabla F(V) = |2 \cdot R_i \cdot V_i|$$

Twierdzenie 4

Jeśli funkcja $F(X)$ jest określona na otwartym zbiorze wypukłym D i jest różniczkowalna względem X to jest ona wypukła wtedy i tylko wtedy gdy:

$$F(X_1) - F(X_2) \geq (X_1 - X_2)^T \nabla F(X_2), \quad [5.2.6]$$

dla wszystkich X_1 i X_2 w D .

Zbiór R^n (zbiór liczb rzeczywistych) jest zbiorem wypukłym. Dalej na podstawie twierdzenia 3 oraz 4, wykaże się że funkcja wynikająca z II prawa Kirchhoffa jest funkcją wypukłą. Dobiera się 2 punkty (X_1, X_2) określone w zbiorze R^n .

Niech

$$X_1 = |V_i'|, X_2 = |V_i''|$$

stąd funkcja

$$F(V) = R_i \cdot (V_i)^2,$$

w punktach X_1 i X_2 przyjmuje odpowiednio wartości:

$$F(X_1) = R_i \cdot (V_i')^2$$

$$F(X_2) = R_i \cdot (V_i'')^2$$

Gradient funkcji w X_2 ma postać

$$\nabla F(X_2) = |2 \cdot R_i \cdot V_i''|,$$

Różnica wektorów X_1 i X_2 ma postać

$$X_1 - X_2 = |V_i'| - |V_i''| = |V_i' - V_i''|,$$

Żeby wykazać wypukłość funkcji należy udowodnić dla funkcji twierdzenie 4:

$$R_i \cdot (V_i')^2 - R_i \cdot (V_i'')^2 \geq |V_i' - V_i''| \cdot |2 \cdot R_i \cdot V_i''| = (V_i' - V_i'') \cdot 2 \cdot R_i \cdot V_i'',$$

co daje

$$R_i \cdot (V_i')^2 - R_i \cdot (V_i'')^2 - 2 \cdot R_i \cdot V_i'' \cdot V_i' + 2 \cdot R_i \cdot (V_i'')^2 \geq 0,$$

redukując oraz wyciągając R_i przed nawias:

$$R_i \cdot [(V_i')^2 - 2 \cdot (V_i' \cdot V_i'') + (V_i'')^2] \geq 0.$$

korzystając ze wzorów na różnicę kwadratów:

$$R_i \cdot (V_i' - V_i'')^2 \geq 0,$$

ponieważ

$R_i > 0$,

wtedy iloczyn jest nieujemnie określony, czyli funkcja

$$F(V) = R_i \cdot (V_i)^2,$$

jest funkcją wypukłą w zbiorze R^n .

Twierdzenie 5

Każda nieujemna kombinacja liniowa funkcji wypukłych w zbiorze wypukłym jest funkcją wypukłą.

Na mocy twierdzenia 5 funkcja typu:

$$F(V) = \sum_{i=1}^m R_i \cdot (V_i)^2, \quad m \in d, \quad d = 1, 2, \dots, n$$

jest funkcją wypukłą gdyż

$$R_i \geq 0,$$

co z kolei powoduje, że funkcje wynikające z pierwszego warunku ograniczającego [5.2.2] są funkcjami wypukłymi.

Twierdzenie 6

Funkcja rzeczywista F określona na zbiorze wypukłym D nazywamy funkcją wypukłą w tym zbiorze, wtedy i tylko wtedy gdy:

$$\begin{aligned} X_1, X_2 &\in D, \\ 0 \leq I \leq 1, \\ F[I \cdot X_1 + (1-I) \cdot X_2] &\leq I \cdot F(X_1) + (1-I) \cdot F(X_2), \end{aligned} \tag{5.2.7}$$

Warunki ograniczające wynikające z I prawa Kirchhoffa [5.2.3] można zapisać w następującej postaci:

$$V_1 + V_2 + \dots + V_i - V_j - V_{j+1} - \dots - V_z = 0,$$

Przyjmując 2 punkty X_1 i X_2

$$X_1 = \begin{pmatrix} V_1' \\ V_2' \\ \dots \\ V_i' \\ V_j' \\ V_{j+1}' \\ \dots \\ V_z' \end{pmatrix}, \quad X_2 = \begin{pmatrix} V_1'' \\ V_2'' \\ \dots \\ V_i'' \\ V_j'' \\ V_{j+1}'' \\ \dots \\ V_z'' \end{pmatrix},$$

stąd

$$I \cdot X_1 + (1-I) \cdot X_2 = \begin{pmatrix} I \cdot V_1' + (1-I) \cdot V_1'' \\ I \cdot V_2' + (1-I) \cdot V_2'' \\ \dots \\ I \cdot V_i' + (1-I) \cdot V_i'' \\ I \cdot V_j' + (1-I) \cdot V_j'' \\ I \cdot V_{j+1}' + (1-I) \cdot V_{j+1}'' \\ \dots \\ I \cdot V_z' + (1-I) \cdot V_z'' \end{pmatrix},$$

Podstawiając do wzoru [5.2.7] z twierdzenia 6

$$\begin{aligned} & I \cdot V_1' + (1-I) \cdot V_1'' + I \cdot V_2' + (1-I) \cdot V_2'' + \dots + I \cdot V_i' + (1-I) \cdot V_i'' - \\ & - I \cdot V_j' - (1-I) \cdot V_j'' - I \cdot V_{j+1}' - (1-I) \cdot V_{j+1}'' - \dots - I \cdot V_z' + (1-I) \cdot V_z'' \leq \\ & \leq I \cdot (V_1' + V_2' + \dots + V_i' - V_j' - V_{j+1}' - \dots - V_z') + (1-I) \cdot (V_1'' + V_2'' + \dots + V_i'' - V_j'' - V_{j+1}'' - \dots - V_z''), \end{aligned}$$

co jest równoważne:

$$0 = 0$$

Z powyższego dowodu wynika wniosek, że funkcje liniowe będące warunkami ograniczającymi wynikającymi z prawa równowagi dla węzłów są funkcjami wypukłymi, ale nie są funkcjami ściśle wypukłymi.

Podsumowując zbiór D wynikający z warunków ograniczających [5.2.2] oraz [5.2.3] jest zbiorem wypukłym na mocy twierdzenia 2.

Dalej należy udowodnić, że funkcja celu:

$$N_u = \sum_{i=1}^{l_w} H_{gi} \cdot V_i$$

jest funkcją wypukłą.

Na początku sprawdza się, czy funkcja

$$F(H, V) = H_i \cdot V_i,$$

jest funkcją wypukłą.

Przyjmując 2 punkty X_1 i X_2

$$X_1 = \begin{pmatrix} H_i' \\ V_i' \end{pmatrix} \quad X_2 = \begin{pmatrix} H_i'' \\ V_i'' \end{pmatrix},$$

$$F(X_1) = H_i' \cdot V_i'$$

$$F(X_2) = H_i'' \cdot V_i'',$$

obliczając pochodne cząstkowe funkcji

$$\frac{dF(H, V)}{dH_i} = V_i$$

$$\frac{dF(H, V)}{dV_i} = H_i,$$

następnie wyznaczając gradient funkcji w punkcie X_2

$$\nabla F(X_2) = \begin{pmatrix} V_i'' \\ H_i'' \end{pmatrix},$$

oraz różnicę wektorów

$$X_1 - X_2 = \begin{pmatrix} H_i' \\ V_i' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} H_i'' \\ V_i'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_i' - H_i'' \\ V_i' - V_i'' \end{pmatrix},$$

Korzystając z twierdzenia 4

$$H_i' \cdot V_i' - H_i'' \cdot V_i'' \geq \begin{pmatrix} H_i' - H_i'' \\ V_i' - V_i'' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_i'' \\ H_i'' \end{pmatrix} = (H_i' - H_i'') \cdot V_i'' + (V_i' - V_i'') \cdot H_i'',$$

co po przeniesieniu daje

$$H_i' \cdot (V_i' - V_i'') - H_i'' \cdot (V_i' - V_i'') \geq 0,$$

$$(H_i' - H_i'') \cdot (V_i' - V_i'') \geq 0,$$

Z kolei wiadomo, że przy zwiększaniu spiętrzenia wentylatora umieszczonego w bocznicy i-tej, w tejże bocznicy następuje zwiększenie wydatku powietrza.

Jeśli

$$H_i'' \geq H_i' \quad \text{zwiększenie spiętrzenia wentylatora to}$$

$$V_i'' \geq V_i' \quad \text{zwiększenie wydatku powietrza}$$

stąd iloczyn dwóch wartości ujemnych daje wartość nieujemną, co należało udowodnić.

Zgodnie z twierdzeniem 5 funkcja

$$N_u = H_1 \cdot V_1 + H_2 \cdot V_2 + \dots + H_i \cdot V_i,$$

będąca nieujemną liniową kombinacją funkcji wypukłych jest funkcją wypukłą.

Zgodnie z twierdzeniem 1 badane zagadnienie jest zagadnieniem programowania wypukłego. Problem ten posiada 1 minimum lokalne w obszarze określonym warunkami granicznymi i jednocześnie to minimum jest również minimum globalnym w tym obszarze.

5.3. Metoda obliczeń rozplywu wymuszonego powietrza dla sieci wentylacyjnych nie zawierających zużytych prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych

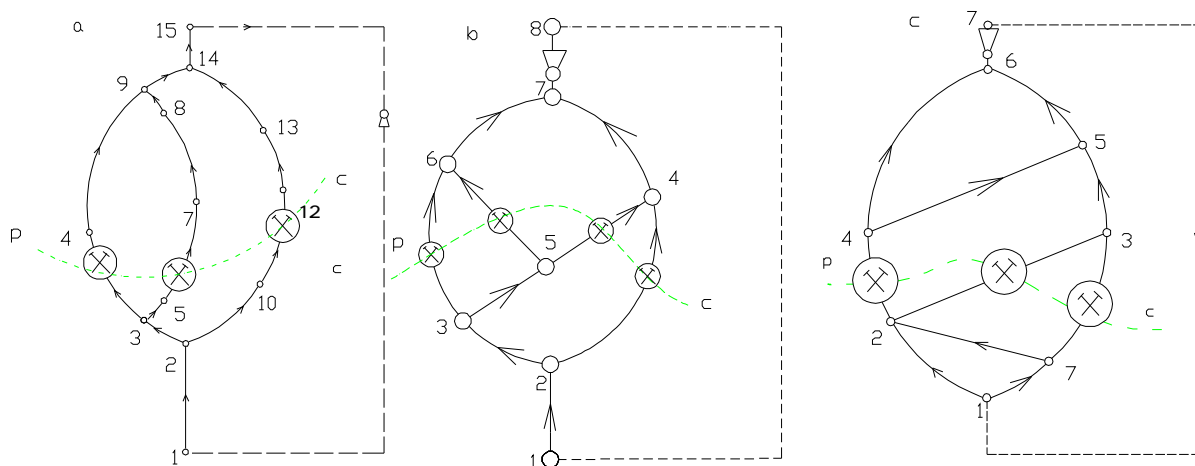
Na stopień trudności rozwiązania zagadnienia rozplywu wymuszonego w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych w decydujący sposób wpływa struktura teŝe sieci, a w szczególności występowanie lub brak prądów zależnych. W niniejszej części pracy omówiony zostanie wspomniany problem dla sieci wentylacyjnych w których nie występują tzw. „prądy międzysystemowe”.

Rodzaje sieci wentylacyjnych można podzielić następująco:

- sieci normalne,
- sieci przekątne z jednym wentylatorem głównym w których nie występują prądy zależne,
- sieci przekątne z jednym wentylatorem głównym w których występują prądy zależne świeŝe lub zuŝyte,
- sieci przekątne z dwoma lub więcej wentylatorami głównymi bez prądów zależnych,
- sieci przekątne z dwoma lub więcej wentylatorami głównymi z prądami zależnymi w strefach świeŝej lub zuŝytej, lecz bez zuŝytych prądów zależnych pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych,
- sieci przekątne zawierające zuŝyte prądy zależne łączące podsieci wentylatorów głównych.

Dla sieci wentylacyjnych o charakterze normalnym (rys. 5.3.1a) wyznaczenie kierunków oraz wydatków powietrza przepływającego przez kaŝdą z bocznic jest stosunkowo proste. Można rozwaŝyć tu pewien szczególny przypadek, mianowicie gdy w strefach powietrza świeŝego oraz powietrza zuŝytego nie występują połączenia równoległe bocznic. Przekrój całkowity przez odbiory powietrza jest wtedy największym przekrojem poprzecznym przez sieć wentylacyjną. Poprzez wykorzystanie wyłącznie prawa równowagi

dla węzłów możliwym staje się wyznaczenie wszystkich wydatków powietrza w sieci. W sytuacji, gdy w którejkolwiek strefie występują połączenia równoległe, obliczenie wydatków powietrza dla bocznic w tymże połączeniu możliwe jest dzięki wykorzystaniu np. pojęcia temperamentu bocznicy. Znając rozpływ powietrza można wykorzystać jedną z podmetod A. Sałustowicza, tj. dokonać regulacji rozpływu powietrza za pomocą tam regulacyjnych, wentylatorów pomocniczych lub obydwu rodzajów urządzeń, przy wcześniejszym wyznaczeniu spiętrzenia wentylatora głównego (wzory 2.3.2. – 2.3.9.).



Rys. 5.3.1. Przykłady sieci wentylacyjnych a) normalnych, b) przekątnych bez prądów zależnych oraz c) przekątnych z prądami zależnymi z jednym wentylatorem głównym.

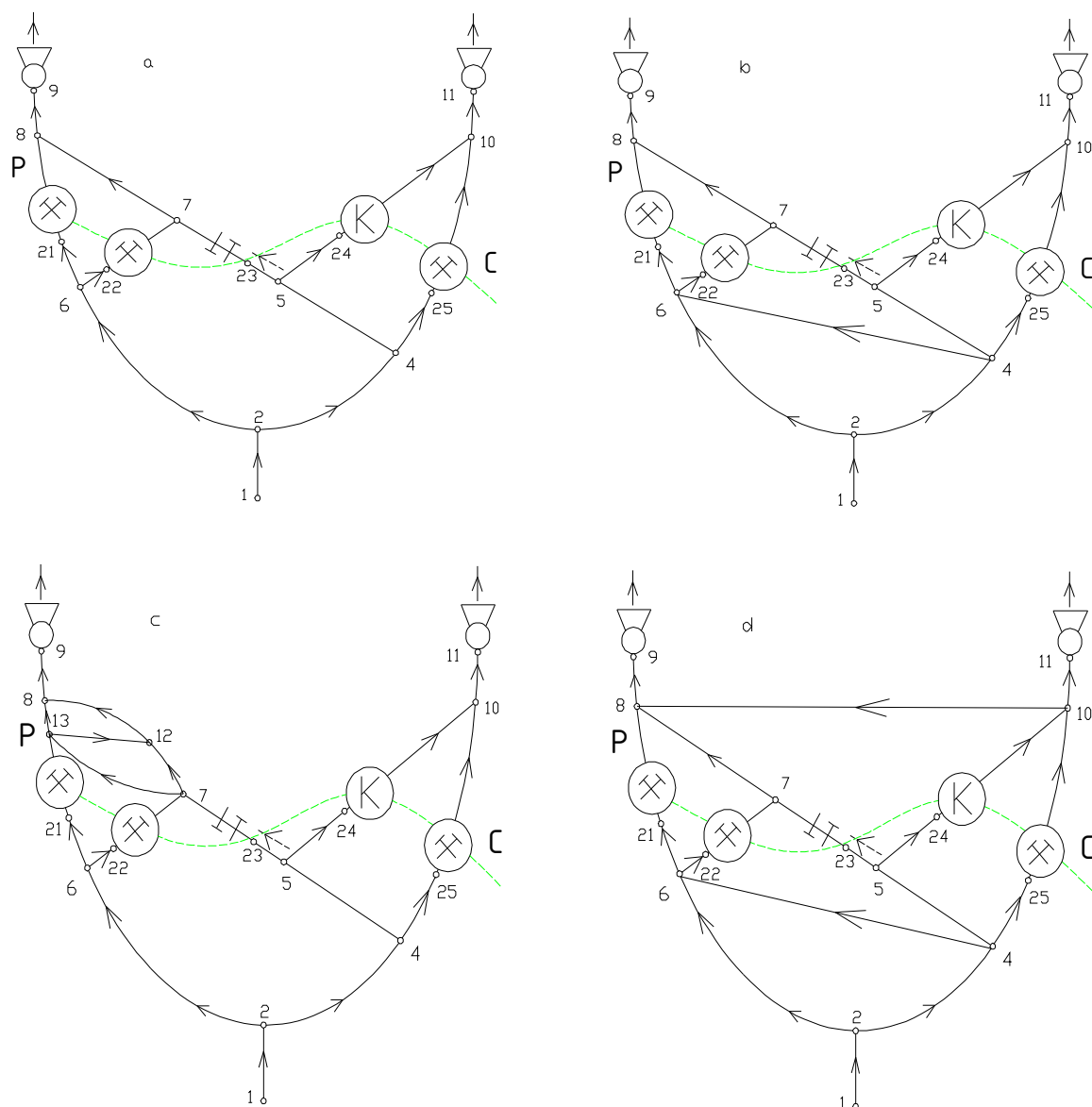
W sieciach wentylacyjnych przekątnych możliwe jest, aby zarówno w strefie powietrza świeżego jak i zużytego nie występowały prądy zależne (rys 5.3.1b). Zakładane wydatki powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego, pozwalają na wyznaczenie rozpływu powietrza w całej sieci, przy wykorzystaniu wyłącznie prawa równowagi dla węzłów. Dalsze postępowanie jest identyczne, jak w przypadku sieci wentylacyjnych o charakterze normalnym.

Dla sieci wentylacyjnych z jednym wentylatorem głównym zawierających prądy zależne w którejkolwiek ze stref (rys. 5.3.1c) wyznaczenie wydatku powietrza w każdej z bocznic jest już bardziej skomplikowane. Koniecznym staje się zastosowanie zarówno I jak i II prawa równowagi dla sieci wentylacyjnych. Ze względu na nieliniowy charakter prawa równowagi dla oczek wentylacyjnych stosowane są metody przybliżone obliczania rozpływu w oczkach wewnętrznych (przedstawione w rozdziale 2). Po wyznaczeniu rozpływu powietrza z żadaną dokładnością, sposób postępowania jest podobny do przedstawionych wcześniej.

W ogólnym przypadku w sieciach wentylacyjnych z jednym wentylatorem głównym założenie określonego wydatku powietrza w każdej boczniczy należącej do przekroju całkowitego pozwala na wyznaczenie rozplywu powietrza w całej sieci na podstawie praw równowagi. Uzyskany z obliczeń rozplyw powietrza jest jedynym możliwym rozplywem spełniającym prawa równowagi (przy założeniu, że regulatory będą znajdować się jedynie w bocznicach z założonymi wydatkami). W praktyce obliczenia były wykonywane po uprzednim rozdzielaniu bocznic w której znajdować się miała tama regulacyjna, na dwie bocznicze, z których jednej nadawano opór równy oporowi wyrobiska, zaś drugiej nadawano wstępnie opór zerowy. Wyznaczany opór drugiej boczniczy otrzymany dzięki obliczeniom rozplywu wymuszonego był równy oporowi tamy regulacyjnej. Liczba równań wynikających z praw równowagi jest równa liczbie bocznic m , natomiast liczba niewiadomych (wydatków powietrza oraz nastaw regulatorów) wynosi $m+1$. Właściwość ta pozwala na zastosowanie w następujących podmetodach:

- a) tamy regulacyjnej o oporze zerowym (brak tamy) na drodze najtrudniejszej przy regulacji dodatniej,
- b) wentylatora pomocniczego o zerowym spiętrzeniu (brak wentylatora) na drodze najłatwiejszej przy regulacji ujemnej,
- c) braku regulatorów na drodze pośredniej przy regulacji mieszanej.

W sieciach wentylacyjnych z dwoma (rys. 5.3.2) lub większą liczbą wentylatorów głównych mogą zachodzić różne przypadki. Pierwszym z nich są sieci w których nie występują prądy zależne (rys. 5.3.2a). Dla takich sieci, tak jak w przypadku sieci z pojedynczym wentylatorem głównym, wydatki powietrza w bocznicach nie należących do przekroju całkowitego mogą być obliczone na podstawie prawa równowagi dla węzłów. W takich sieciach wentylacyjnych możliwe jest wyodrębnienie podsieci poszczególnych wentylatorów głównych. Nie występowanie prądów zależnych powoduje brak prądów łączących podsieci wentylatorów głównych, a poprzez to każda z dróg niezależnych przechodzących przez bocznicze należące do przekroju całkowitego prowadzi tylko do jednego wentylatora głównego. Dzięki temu wspomniany zbiór dróg niezależnych można rozdzielić na l_w zbiorów przynależnych do poszczególnych podsieci wentylatorów głównych. W każdym z tych zbiorów można wskazać drogę krytyczną (najtrudniejszą, najłatwiejszą lub pośrednią) ze względu na zastosowany sposób regulacji. Korzystając ze wzorów 2.3.2.–2.3.9. wyznacza się spiętrzenia wentylatorów głównych, a następnie nastawy pozostałych regulatorów.



Rys. 5.3.2. Przykłady sieci wentylacyjnych a) bez prądów zależnych, b) z prądami zależnymi w strefie świeżej c) z prądami zależnymi w strefie zużytej oraz d) z użytymi prądami zależnymi pomiędzy podsieciami dwóch wentylatorów głównych

Dla sieci wentylacyjnych z prądami zależnymi, lecz bez prądów łączących podsieci wentylatorów głównych w strefie zużytej (rys. 5.3.2 b i c), wzrasta stopień trudności obliczeń, ze względu na konieczność wyznaczenia naturalnego rozplywu powietrza w wewnętrznych oczkach dla strefy świeżej oraz strefy zużytej. Dzięki zastosowaniu znanych metod przybliżonych (np. metody Crossa) jest to jednak możliwe. Wyznaczony rozplyw powietrza jest jedynym spełniającym prawa równowagi dla sieci wentylacyjnych. Znajac wydatki

powietrza w każdej z bocznic dalszy sposób postępowania jest podobny do przypadku, gdy w sieci wentylacyjnej nie występują prądy zależne.

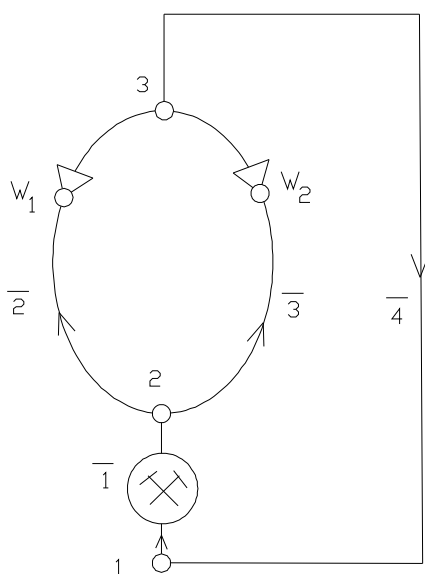
Rozpatrując dowolny schemat kanoniczny sieci wentylacyjnych nie zawierających zużytych prądów zależnych łączących podsieci wentylatorów głównych, można zauważyć, że zaliczenie wszystkich bocznic należących do przekroju całkowitego oraz bocznicy/bocznic z wentylatorem głównym (w sieciach wentylacyjnych z większą liczbą wentylatorów głównych, wystarczające jest zaliczenie pojedynczej dowolnej bocznicy z wentylatorem głównym) do tzw. antydrzewa powoduje rozbięcie grafu reprezentującego badaną sieć na pewną liczbę podgrafów niespójnych. Liczba ta jest równa liczbie bocznic z wentylatorami głównymi zaliczonymi do antydrzewa powiększonej o jeden. Maksymalna liczba podgrafów będzie więc wynosić $l_w + 1$. Poszczególne podgrafy będą reprezentować strefę powietrza świeżego oraz podsieci wentylatorów głównych w strefie powietrza zużytego. Oczywiście jest, że w takim przypadku narzucenie wydatku powietrza na wentylatorze głównym (a poprzez to zaliczenie bocznic antydrzewa) różnego od ilości powietrza wpływającego do podsieci okaże się błędne.

W sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne łączące podsieci wentylatorów głównych (rys. 5.3.2d), obecność takiego prądu pozwala na „skierowanie” powietrza na poszczególne wentylatory. Dlatego, w takich sieciach będzie istnieć nieskończenie wiele rozpływów powietrza spełniających prawa równowagi oraz zapewniających dostarczenie wcześniej określonej ilości powietrza do bocznic należących do przekroju całkowitego. Zagadnienie to, zostanie szerzej omówione w kolejnych podrozdziałach pracy.

5.4. Zastosowanie metody złotego podziału do obliczeń rozplywu wymuszonego w sieciach z dwoma wentylatorami głównymi zawierającymi zużyte prądy zależne łączące ich podsieci

W poprzednim rozdziale podane zostały zasady postępowania przy obliczaniu rozplywu wymuszonego powietrza w sieciach wentylacyjnych bez tzw. prądów „międzysystemowych”. Jak wskazano wykorzystanie metody Crossa oraz jednej z podmetod Sałustowicza pozwala na wyznaczenie rozwiązania optymalnego pod względem użytej mocy wentylatorów. Zagadnienia te znane są literaturze [110, 115]. Powstaje więc pytanie, czy wymienione algorytmy są równie skuteczne oraz wystarczające dla dowolnych sieci wentylacyjnych? Na początku rozważony będzie pewien szczególny przykład sieci wentylacyjnej, dla którego wyznaczone zostanie rozwiązanie optymalne, które z kolei porównane zostanie z innym rozwiązaniem spełniającym narzucone warunki.

Sieć wentylacyjna o strukturze pokazanej na rysunku 5.4.1. nie posiada bocznicy łączących podsieci wentylatorów W_1 oraz W_2 . Jednak w węźle 2 następuje łączenie tychże podsieci w strefie powietrza zużytego. Jest to więc szczególny przypadek łączenia podsieci wentylatorów głównych nie przy udziale prądów „międzysystemowych”, lecz za pomocą węzła. Dzięki takiemu połączeniu również staje się możliwe kierowanie określonej ilości powietrza na poszczególne wentylatory. Czynność ta odbywać się będzie poprzez dobranie odpowiednich spiężeń wentylatorów głównych W_1 oraz W_2 .



Rys. 5.4.1. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej B.

Dane początkowe dla rozpatrywanej sieci zostały zebrane w tablicy 5.4.1.

Tab. 5.4.1.

Parametry sieci wentylacyjnej B.

Numer bocznic	Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznic [kg/m ⁷]	Zadany wydatek [m ³ /s]
1	1	2	0,1	20
2	2	3	0,2	-
3	2	3	0,5	-
4	3	1	0	-

Można więc ułożyć następujący układ równań korzystając z praw równowagi dla sieci wentylacyjnych:

$$V_1 - V_2 - V_3 = 0 \quad (a)$$

$$V_1 - V_4 = 0 \quad (b)$$

$$R_2 \cdot (V_2)^2 - H_1 + H_2 - R_3 \cdot (V_3)^2 = 0 \quad (c)$$

$$R_1 \cdot (V_1)^2 + R_2 \cdot (V_2)^2 - H_2 = 0 \quad (d)$$

Liczba niewiadomych wynosi 5 (V_2 , V_3 , V_4 , H_1 , H_2) i jest większa niż liczba równań. Możliwość „skierowania” odpowiedniej ilości powietrza na wentylator główny W_1 , powoduje powstanie pytania: jaka jest optymalna ilość powietrza na wentylatorze W_1 , aby sumaryczna moc obydwu wentylatorów była jak najmniejsza? W zapisie matematycznym problem można ująć następująco:

$$N_u = H_1 \cdot V_2 + H_2 \cdot V_3 = \min.$$

przy wcześniejszych ograniczeniach.

Uwzględniając równania a, c oraz d w powyższym układzie równań równowagi można je zapisać następująco:

$$V_3 = V_1 - V_2$$

$$H_1 = R_1 \cdot (V_1)^2 + R_2 \cdot (V_2)^2$$

$$H_2 = R_1 \cdot (V_1)^2 + R_2 \cdot (V_2)^2 + R_3 \cdot (V_3)^2 - R_2 \cdot (V_2)^2 = R_1 \cdot (V_1)^2 + R_3 \cdot (V_3)^2$$

dalej możliwe staje się zapisanie funkcji celu jako funkcji jednej zmiennej (V_2)

$$N_u = (R_1 \cdot (V_1)^2 + R_2 \cdot (V_2)^2) \cdot V_2 + (R_1 \cdot (V_1)^2 + R_3 \cdot (V_1 - V_2)^2) \cdot (V_1 - V_2)$$

ponieważ R_i oraz V_1 są wartościami stałymi. Po podstawieniu danych uzyskuje się:

$$N_u = (40 + 0,2 \cdot (V_2)^2) \cdot V_2 + (40 + 0,5 \cdot (20 - V_2)^2) \cdot (20 - V_2)$$

co po przekształceniach daje:

$$N_u = -0,3 \cdot (V_2)^3 + 30 \cdot (V_2)^2 - 600 \cdot (V_2) - 600$$

obliczając pochodną względem V_2 uzyskuje się:

$$N_u' = -0,9 \cdot (V_2)^2 + 60 \cdot (V_2) - 600$$

i po przyrównaniu do zera wyznacza się wartości V_2 przy których funkcja osiąga minimum:

$$V_2 = 12,251 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

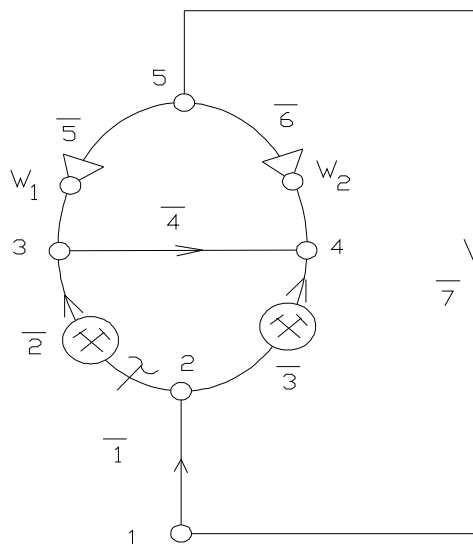
$$V_2 = 54,415 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Rozwiązanie drugie powodowałoby, iż w bocznic 3 nastąpiłoby odwrócenie kierunku przepływu powietrza, zatem rozwiązanie pierwsze jest rozwiązaniem optymalnym. Dla takiego rozplywu powietrza w sieci uzyskuje się moc wentylatorów głównych:

$$N_u = 1400,386 \text{ W}$$

Bardzo proste jest również obliczenie spiętrzeń wentylatorów głównych, a następnie ich mocy przy równym rozkładzie ilości powietrza na oba wentylatory ($V_2=V_3=10 \text{ m}^3/\text{s}$). Dla takiego rozplywu wymagane spiętrzenia wynoszą $H_1 = 60 \text{ Pa}$, $H_2 = 90 \text{ Pa}$, natomiast moc wentylatorów wynosi 1500 W. Rozwiązanie to jest więc gorsze od rozwiązania poprzedniego, jeżeli za kryterium zostanie wybrana minimalizacja mocy wentylatorów. W skrajnych przypadkach, gdy cała ilość powietrza płynie przez jeden z wentylatorów głównych potrzebna moc wentylatorów głównych znacząco rośnie.

Bardziej skomplikowane (ze względu na pierwotną nieznajomość kierunku prądu powietrza w bocznic 3 4) jest wyznaczenie mocy wentylatorów jako funkcji jednej zmiennej dla sieci wentylacyjnej jak na rysunku 5.4.2.



Rys. 5.4.2. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej z prądem „międzysystemowym” w strefie zużytej

Uzyskanie takiej zależności metodami dokładnymi dla dowolnej sieci wentylacyjnej okazuje się niemożliwe. Jednak w obydwu wskazanych przykładach obecność węzła lub bocznicy łączącej podsieci wentylatorów głównych pozwala na otrzymanie nieskończenie wielu rozwiązań różniących się rozplywem powietrza w strefie zużytej, a poprzez to wymaganymi punktami pracy wentylatorów. Spowodowane jest to możliwością wyboru takiego antydrzewa, w skład którego oprócz bocznic należących do przekroju całkowitego (bocznica 2 oraz 3 na rys. 5.4.2.) wchodzi również bocznice z wentylatorem głównym (bocznica 5 lub bocznica 6 na rys. 5.4.2., lecz nie obydwie jednocześnie). Dla tak dobranych bocznic antydrzewa można narzucić niezależny warunek wydatku powietrza w tych bocznicach. Rozsądnym ze względu na przeznaczenie szybów (wdechowy lub wydechowy) wydaje się być, aby założony wydatek powietrza na wentylatorze głównym nie przekroczył wartości całkowitego wydatku powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego, co można zapisać następująco:

$$0 \leq V_{w_i} \leq V_{pc} \quad [5.4.1]$$

Niespełnienie tego warunku, oznaczałoby odwrócenie się kierunku przepływu powietrza w niektórych szymbach wydechowych, co może mieć pewne znaczenie w stanach awaryjnych. Założenie konkretnego wydatku powietrza na jednym z wentylatorów głównych determinuje (w sieciach z dwoma wentylatorami głównymi) wydatek powietrza na drugim. Wynika to z jednakowej całkowitej ilości powietrza przepływającej przez dowolny przekrój poprzeczny przez sieć. Z tego powodu całkowity wydatek powietrza przepływającego przez wentylatory główne musi być równy całkowitemu wydatkowi powietrza przepływającego przez bocznicę należące do przekroju całkowitego przez odbiory, który jest znany.

$$\sum_{i=1}^{l_w} V_{w_i} = \sum_{j=1}^{l_{pc}} V_j = V_{pc} \quad j \in p-c \quad [5.4.2]$$

Jako, że sieć wentylacyjna posiada dwa wentylatory główne, więc:

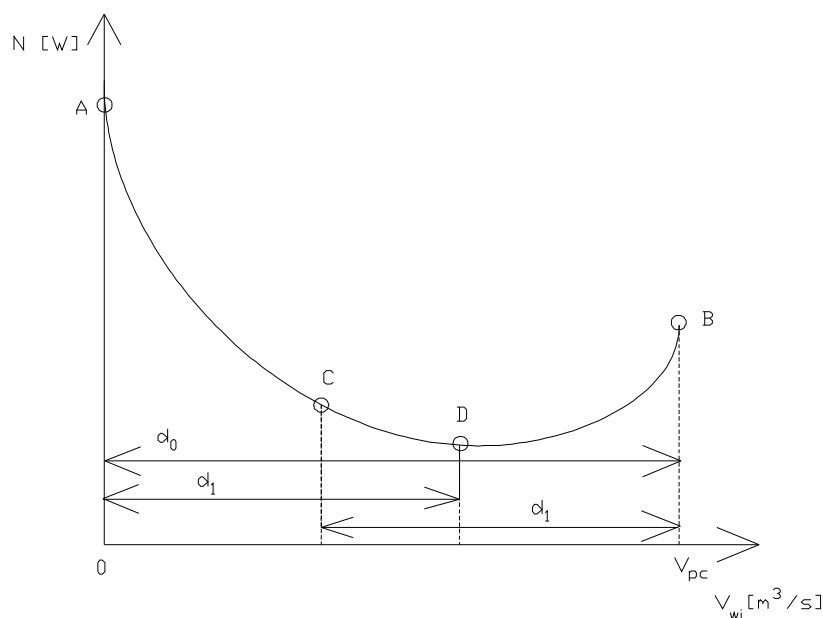
$$V_{w_2} = \sum_{j=1}^{l_{pc}} V_j - V_{w_1} \quad j \in p-c \quad [5.4.3]$$

Różnice w uzyskanych rozplywach powietrza powodują zróżnicowane zużycie mocy wentylatorów. Koniecznym staje się więc zastosowanie metody pozwalającej na wybór rozwiązania optymalnego.

W rozdziale 5.2. stwierdzono, iż przedmiotowa funkcja celu jest określona na zbiorze wypukłym oraz posiada charakter wypukły. Dlatego moc wentylatorów jako funkcja wydatku powietrza na jednym z nich również jest funkcją wypukłą. Należy więc znaleźć taką wartość

wydatku powietrza na jednym z wentylatorów głównych, przy której sumaryczna moc użyteczna wentylatorów jest najmniejsza. Ponieważ wyżej wymieniona funkcja wypukła określona na zbiorze wypukłym (wynikającym z warunków równowagi) jest funkcją unimodalną w przedziale $[0, V_{pc}]$ (posiadającą jedno minimum, będące jednocześnie minimum globalnym), a jednocześnie jest funkcją ciągłą ze względu na wydatek powietrza na wentylatorze w tymże przedziale, dlatego możliwym staje się zastosowanie metody złotego podziału w celu znalezienia z określoną dokładnością przedziału w którym znajduje się minimum globalne. Można więc traktować problem jako zagadnienie znalezienia minimum sumarycznej mocy wentylatorów jako funkcji jednej zmiennej niezależnej - wydatku powietrza na jednym z wentylatorów głównych bez ograniczeń narzucanych na ten wydatek.

Metoda złotego podziału polega na zacieśnianiu pierwotnego przedziału, w kolejnych iteracjach. Według literatury [66, 69] metoda charakteryzuje się dobrą zbieżnością oraz prostotą obliczeń. Algorytm złotego podziału zakłada zmniejszanie wielkości kolejnych przedziałów o stały współczynnik k wynoszący 0,6180339. Granicami początkowego przedziału (w zerowej iteracji) powinny być wartości $V_{wi, l, 0} = 0$ oraz $V_{wi, p, 0} = V_{pc}$, czyli długość przedziału d_0 w tej iteracji wynosi V_{pc} (rys. 5.4.3).



Rys. 5.4.3. Metoda złotego podziału – zastosowanie dla sieci wentylacyjnych

Symbole l oraz p znajdujące się w dolnych indeksach oznaczają odpowiednio lewą granicę przedziału oraz prawą granicę przedziału ze względu na wydatek powietrza na wentylatorze i-tym V_{wi} , natomiast liczba 0 oznacza zerową iterację. Dla tak narzuconych

wydatków powietrza (0 oraz V_{pc}) na i-tym wentylatorze głównym oraz pozostałych zadanych wydatków powinien w dalszej kolejności zostać obliczony rozpływ powietrza w strefach świeżej oraz zużytej (jedną ze znanych metod przybliżonych podanych w rozdziale 2), a następnie w zależności od wybranej podmetody regulacji (wzory 2.3.2 – 2.3.9), należy obliczyć nastawy regulatorów. Znając potrzebne parametry pracy wentylatorów, obliczana jest ich sumaryczna moc (punkty A oraz B na rys.5.4.3). Ze względu na charakter funkcji mocy wentylatorów (wypukłość funkcji), jedno z rozwiązań uzyskanych dla początkowej granicy przedziału, będzie najmniej korzystne ze względu na zużycie mocy wentylatorów (przy założeniu, że w każdym z otrzymanych rozwiązań na drodze krytycznej nie są stawiane regulatory), na rysunku jest to lewa granica przedziału oraz odpowiadający jej punkt A. W iteracji pierwszej początkowo obliczana jest długość przedziału, który zostanie uzyskany po skończeniu tej iteracji ze wzoru:

$$d_i = k \cdot d_{i-1} \quad [5.4.4]$$

dalej obliczane są wartości narzuconych wydatków powietrza na wentylatorach zgodnie z wzorem:

$$\begin{aligned} V_{wi,l,i+1} &= V_{wi,p,i} - d_i \\ V_{wi,p,i+1} &= V_{wi,l,i} + d_i \end{aligned} \quad [5.4.5]$$

dla tak zadanych wydatków powietrza na wentylatorze głównym, obliczany jest rozpływ powietrza w strefach świeżej oraz zużytej, a następnie w zależności od wybranej podmetody regulacji (wzory 2.3.2 – 2.3.9), należy obliczyć nastawy regulatorów. Znając potrzebne parametry pracy wentylatorów, obliczana jest ich sumaryczna moc (punkt C dla górnego założenie we wzorze 5.4.5 oraz punkt D dla dolnego założenia z tego samego wzoru rys. 5.4.3.). Kolejnym krokiem jest porównanie wartości uzyskanych sumarycznych mocy wentylatorów w badanych punktach. Możliwe jest zajście następujących przypadków:

$$N_u f(V_{wi,l,i+1}) \geq N_u f(V_{wi,p,i+1}) \quad [5.4.6]$$

wtedy granice przedziału przyjmowane przed kolejną iteracją wynoszą:

$V_{wi,l,i+1}$ co oznacza zaciśnienie przedziału z lewej strony

$V_{wi,p,i}$ co oznacza pozostawienie bez zmian przedziału z prawej strony

Sytuacja określona wzorem 5.4.6. jest zgodna z rysunkiem 5.4.3, czyli nowymi granicami przedziału jest rzut punktu C na oś wydatku z lewej strony przedziału oraz rzut punktu B na oś wydatku z prawej strony. Należy zauważyć, że w każdej kolejnej iteracji jeden z punktów odpowiadających założonemu wydatkowi powietrza na wentylatorze głównym (poprzez to odpowiedniemu rozplwowi powietrza w sieci wentylacyjnej) będzie identyczny

z punktem w iteracji poprzedzającej (dla przykładu przedstawionego na rysunku będzie to punkt D, który wystąpi w drugiej iteracji), dla którego moc wentylatorów została już obliczona.

Drugim przypadkiem jest następujący:

$$N_u f(V_{wi,l,i+1}) < N_u f(V_{wi,p,i+1}) \quad [5.4.7]$$

wtedy granice przedziału przyjmowane przed kolejną iteracją wynoszą:

$V_{wi,l,i}$ co oznacza pozostawienie bez zmian przedziału z lewej strony

$V_{wi,p,i+1}$ co oznacza zacieśnienie przedziału z prawej strony

Po zacieśnieniu przedziału przechodzi się do kolejnej iteracji, rozpoczynając od obliczenia długości przedziału ze wzoru 5.4.4. Dalszy sposób postępowania jest identyczny jak w iteracji pierwszej. Obliczenia zostają zakończone w momencie, gdy długość przedziału niepewności będzie mniejsza od dopuszczalnej (założonej przed rozpoczęciem obliczeń) lub aby uchyb u , był mniejszy od dopuszczalnego.

Długość przedziału po wykonaniu i iteracji wynosi:

$$d_i = V_{pc} \cdot k^{(i-1)} \quad [5.4.8]$$

Liczba potrzebnych iteracji, do uzyskania uchybu mniejszego niż uchyb dopuszczalny u wynosi:

$$i = \text{int} \left(\frac{-\ln\left(\frac{V_{pc}}{2}\right) + \ln u}{\ln(k)} \right) + 1 \quad [5.4.9]$$

W celu zmniejszenia uchybu, po zakończeniu obliczeń iteracyjnych można założyć wydatek powietrza na wentylatorze obliczony ze wzoru:

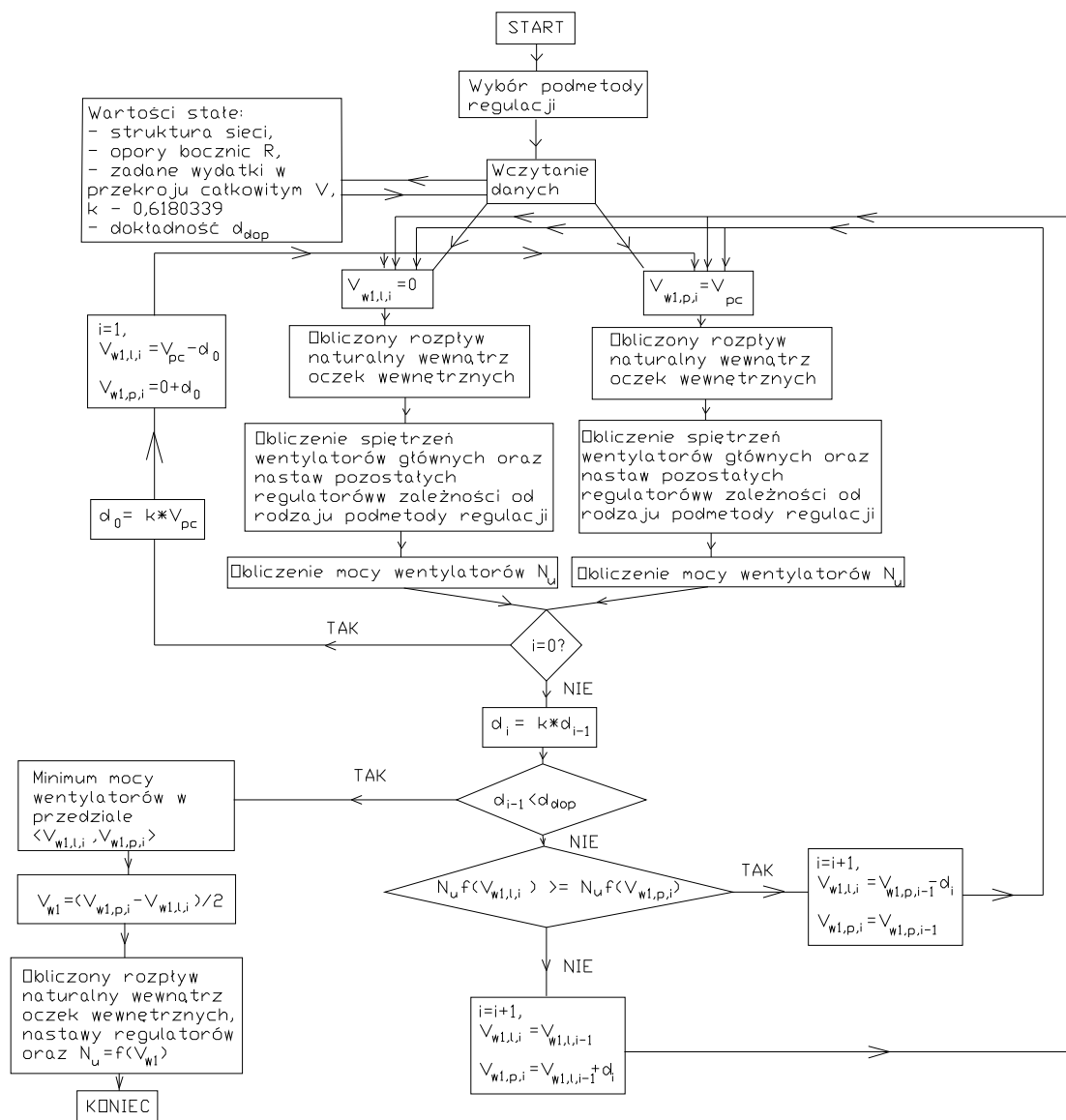
$$V_{wi} = \frac{V_{wi,p,i} + V_{wi,l,i}}{2} \quad [5.4.10]$$

Dla kopalni o wydatku całkowitym V_{pc} wynoszącym 30000 m³/min, po 20 iteracjach przedział w którym będzie się znajdowało minimum ze względu na moc wentylatorów będzie miał długość 3,2 m³/s, zaś liczba iteracji potrzebna aby dokładność wyznaczenie minimum była mniejsza niż 1 m³/s wynosi 25.

Końcowo należy zauważyć, że metodę złotego podziału można stosować dla sieci wentylacyjnych z dwoma wentylatorami głównymi zawierającymi zużyte prądy zależne łączące podsieci tych wentylatorów oraz dla szczególnych przypadków sieci wentylacyjnych z większą liczbą wentylatorów głównych.

Przykład obliczeniowy wykorzystujący tą metodę zostanie przedstawiony w kolejnym rozdziale. Zostanie tam również dokonane porównanie metod.

Schemat blokowy omawianej metody został przedstawiony na rysunku 5.4.4.

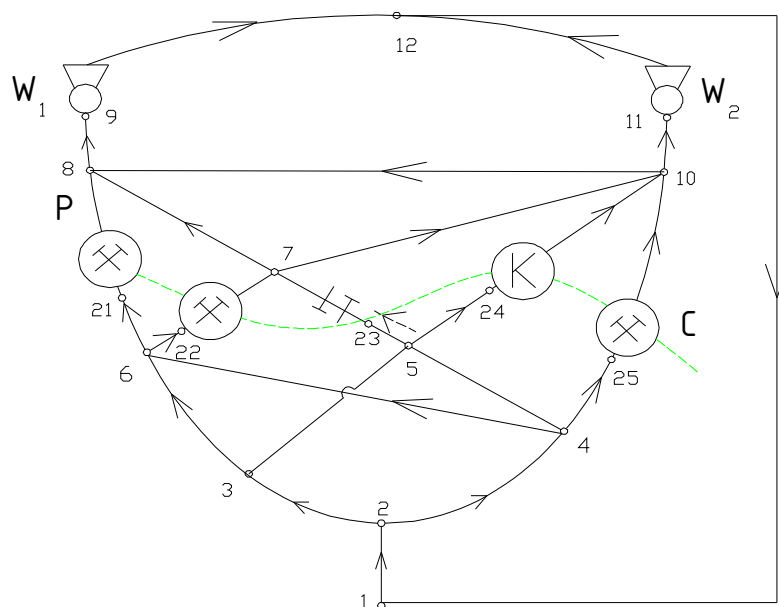


Rys. 5.4.4. Schemat blokowy metody optymalizacji rozptywu wymuszonego wykorzystujący metodę złotego podziału

5.5. Charakterystyki sumarycznej mocy wentylatorów jako funkcji wydatku powietrza w zagadnieniu obliczania rozplywu wymuszonego

Sposób postępowania przy wyznaczaniu rozwiązania zbliżonego do optymalnego, opisany w poprzedniej części pracy, wskazuje na istnienie ciągu kolejnych rozwiązań, w których moc wentylatorów jest funkcją wydatku powietrza przepływającego przez wentylator głównego przewietrzania. W niniejszym podrozdziale pokazana zostanie możliwość wykorzystania tytułowych charakterystyk w celu znalezienia minimum mocy wentylatorów. Posługiwanie się charakterystykami zastępczymi znane jest w literaturze [71, 74, 78]. Sieci wentylacyjne rozdzielane są na pewne fragmenty nazwane podsieciami oraz na otoczenie podsieci dla których możliwe jest wyznaczenie ich charakterystyk. Dotyczy to jednak problemu rozplywu naturalnego. Dla wyznaczenia charakterystyk zastępczych stosowane są różne metody: pomiarowa – dla istniejących otoczeń podsieci kopalnianych, kolejnych rozwiązań sieci wentylacyjnej – obliczanych przy różnych oporach podsieci, rozwinięcia w szereg Taylora. W pracy zostanie zastosowana metoda kolejnych rozwiązań dla obliczeń rozplywu wymuszonego.

Celem lepszego zobrazowania metoda zostanie przedstawiona na przykładzie obliczeniowym. Dla sieci wentylacyjnej pokazanej na rys. 5.5.1 zostaną obliczone kolejne rozplywy wymuszone.



Rys. 5.5.1. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej do wyznaczenia charakterystyki sumarycznej mocy wentylatorów od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator główny

Informacje o bocznicach sieci wentylacyjnej z rysunku 5.5.1 oraz zadane wydatki zostały umieszczone w tablicy 5.5.1.

Tab. 5.5.1.

Dane o sieci wentylacyjnej z rys. 5.5.1.

Numer bocznicy	Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznicy [mBd]	Zadany wydatek [m ³ /min]
1	4	25	?	1200
2	25	10	80	-
3	5	24	?	800
4	24	10	100	-
5	5	23	?	500
6	23	7	150	-
7	6	22	?	1500
8	22	7	80	-
9	6	21	?	1000
10	21	8	50	-
11	1	2	100	0
12	2	3	150	-
13	2	4	80	-
14	3	5	70	-
15	3	6	100	-
16	4	6	120	-
17	4	5	140	-
18	7	8	30	-
19	7	10	80	-
20	8	9	150	-
21	8	10	50	-
22	10	11	80	-
23	9	12	0	-
24	11	12	0	-
25	12	1	0	-

? – oznacza, że w danych wejściowych zostaje wprowadzona wartość 0 oporu bocznicy, natomiast wyznaczona w obliczeniach wartość będzie oporem tamy regulacyjnej.

Dla rozważanej sieci zastosowano podmetodę regulacji dodatniej w celu uzyskania żadanego rozpływu powietrza, po uprzednim obliczeniu naturalnego rozpływu powietrza w wewnętrznych oczkach strefy świeżej oraz strefy zużytej powietrza. Do obliczeń został wykorzystany pakiet programów komputerowych „WK”. W danych wejściowych zapisywana

jest struktura sieci za pomocą skróconej macierzy sąsiedztwa, jak również każdej bocznic nadany zostaje jej opór. Program oblicza naturalny rozpływ powietrza w oczkach wewnętrznych strefy powietrza świeżego i zużytego. Dla bocznic z zadaniem wydatkiem powietrza wyznaczony zostaje spadek lub przyrost naporu na regulatorze, który pozwala na spełnienie II prawa równowagi dla sieci wentylacyjnych. W tablicy 5.5.2 został pokazany rozpływ powietrza oraz żądane nastawy regulatorów, przy równomiernym rozplywie powietrza na obydwa wentylatory główne. W każdej z tablic otrzymanych z programu „WK” kolorem czerwonym bocznic z tamami regulacyjnymi lub wentylatorami pomocniczymi (opór bocznicy jest oporem tamy regulacyjnej, zaś w kolumnie depresja znajduje się potrzebne spiętrzenie wentylatora pomocniczego), zaś kolorem niebieskim zaznaczone bocznic z wentylatorami głównymi.

Tab. 5.5.2.
Wyniki obliczeń rozplywu powietrza
w kopalnianej sieci wentylacyjnej dla sieci z rysunku 5.5.1

ms-400 siec przekatna 2 wentylatory 5 odbiorow do optymalizacji funkcj Nu=f(V)
bocznic : 25 wezlow : 17 maks. wartosc wezla : 25 wentylatorow : 0

Numer bocznicy	Wezly bocznicy		Opór (mBd)	Wydatek powietrza (m3/min) (m3/s)		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
1	4	25	192.120	1200.00	20.0000	76.848	0.000
2	25	10	80.000	1200.00	20.0000	32.000	0.000
3	5	24	454.510	800.00	13.3333	80.801	0.000
4	24	10	100.000	800.00	13.3333	17.778	0.000
5	5	23	1092.270	500.00	8.3333	75.852	0.000
6	23	7	150.000	500.00	8.3333	10.417	0.000
7	6	22	0.000	1500.00	25.0000	0.000	0.000
8	22	7	80.000	1500.00	25.0000	50.000	0.000
9	6	21	177.300	1000.01	16.6668	49.251	0.000
10	21	8	50.000	1000.01	16.6668	13.889	0.000
11	1	2	100.000	5000.00	83.3334	694.445	0.000
12	2	3	150.000	2104.57	35.0762	184.551	0.000
13	2	4	80.000	2895.43	48.2571	186.300	0.000
14	3	5	70.000	786.14	13.1023	12.017	0.000
15	3	6	100.000	1318.44	21.9739	48.285	0.000
16	4	6	120.000	1181.57	19.6928	46.537	0.000
17	4	5	140.000	513.86	8.5643	10.269	0.000
18	7	8	30.000	1255.69	20.9282	13.140	0.000
19	7	10	80.000	744.30	12.4050	12.311	0.000
20	8	9	150.000	2500.00	41.6667	260.417	0.000
21	8	10	50.000	-244.30	-4.0717	-0.829	0.000
22	10	11	80.000	2500.00	41.6667	138.889	0.000
23	9	12	0.000	2500.00	41.6667	0.000	1250.838
24	11	12	0.000	2500.00	41.6667	0.000	1128.481
25	12	1	0.000	5000.00	83.3334	0.000	0.000

Z E S T A W I E N I E					P O T E C J A L O W				
K O P A L N I A N E J					S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-694	-879	-881	-891	-927	-977	-990	-1251	-990
11	12	21	22	23	24	25			
-1128	0	-977	-927	-967	-972	-958			

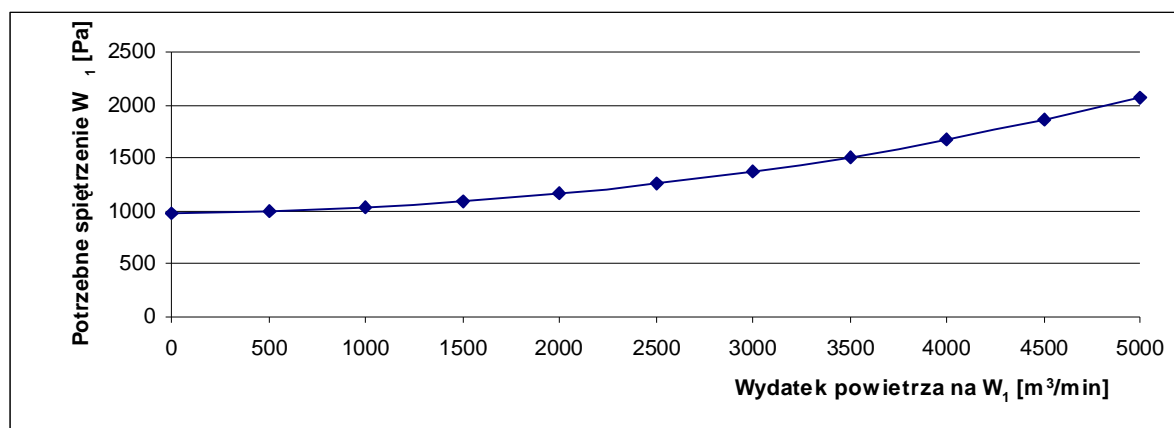
Wykonano również obliczenia rozpyłu wymuszonego dla różnych wartości wydatków powietrza na wentylatorze pierwszym W_1 przy zachowaniu stałych narzuconych wydatków powietrza w odbiorach. Najważniejsze wyniki dla każdego z rozwiązań zostały zebrane w tablicy 5.5.3. Pogrubioną czcionką zostało wskazane rozwiązania przy równomiernym rozpylu powietrza pomiędzy wentylatorami W_1 oraz W_2 .

Tab. 5.5.3.

Wyniki obliczeń parametrów wentylatorów głównych według 11 wariantów rozpyłu wymuszonego dla sieci z rysunku 5.5.1

Wydatek powietrza na wentyl. W_1 [m ³ /min] Wartości przyjmowane	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W_1 [Pa]	Moc wentylatora W_1 [W]	Wydatek powietrza na wentylatorze W_2 [m ³ /min]	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W_2 [Pa]	Moc wentylatora W_2 [W]	Całkowita moc wentylatorów [W]
0	981	0	5000	1574	131147	131147
500	993	8279	4500	1458	109323	117602
1000	1027	17121	4000	1355	90337	107458
1500	1082	27046	3500	1266	73849	100895
2000	1156	38550	3000	1191	59527	98077
2500	1251	52118	2500	1129	47020	99138
3000	1367	68375	2000	1076	35851	104226
3500	1507	87890	1500	1033	25816	113706
4000	1668	111236	1000	1001	16688	127924
4500	1853	139009	500	983	8190	147199
5000	2061	171728	0	976	0	171728

Następnie dokonano aproksymacji potrzebnych spiętrzeń wentylatorów od wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym oraz mocy wentylatorów od wydatku na wentylatorze pierwszym funkcjami liniowymi, kwadratowymi oraz wielomianami trzeciego stopnia. Podano również wartości R^2 , dla każdej z aproksymacji.



Rys. 5.5.2. Wykres zależności pomiędzy potrzebnym spiętrzeniem wentylatora W_1 , a wydatkiem powietrza przepływającego przez niego dla sieci z rysunku 5.5.1

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.2 funkcją liniową:

$$H_{w1} = 0,215 \cdot (V_{w1}) + 821,390$$

$$R^2 = 0,9272$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.2 funkcją kwadratową:

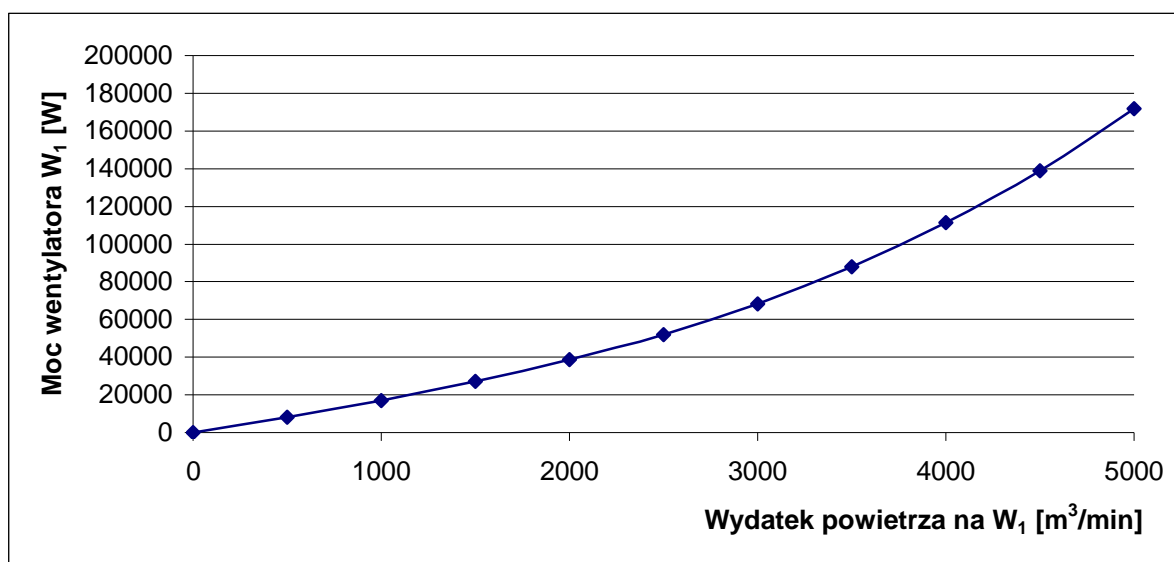
$$H_{w1} = 0,0000431 \cdot (V_{w1})^2 - 0,000675 \cdot (V_{w1}) + 983,139$$

$$R^2 = 1$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.2 wielomianem trzeciego stopnia:

$$H_{w1} = 0,0000000006 \cdot (V_{w1})^3 + 0,0000384 \cdot (V_{w1})^2 + 0,00836 \cdot (V_{w1}) + 980,291$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.3. Wykres zależności mocy użytecznej wentylatora W_1 od wydatku powietrza przepływającego przez niego dla sieci z rysunku 5.5.1

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.3. funkcją liniową:

$$N_{u,w1} = 33,008 \cdot (V_{w1}) - 16942$$

$$R^2 = 0,9488$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.3 funkcją kwadratową:

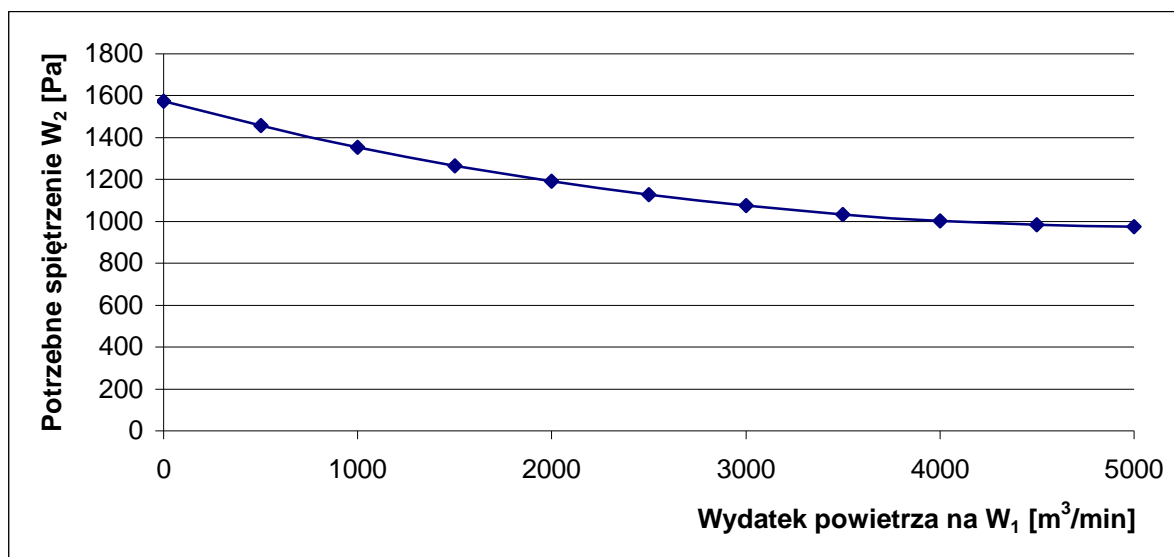
$$N_{u,w1} = 0,0054 \cdot (V_{w1})^2 + 6,0106 \cdot (V_{w1}) + 3306,2$$

$$R^2 = 0,9983$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.3 wielomianem trzeciego stopnia:

$$N_{u,w1} = 0,0000007 \cdot (V_{w1})^3 - 0,000195 \cdot (V_{w1})^2 + 16,676 \cdot (V_{w1}) - 50,282$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.4. Wykres zależności pomiędzy potrzebnym ciśnieniem wentylatora W_2 a wydatkiem powietrza przepływającego przez wentylator W_1 dla sieci z rysunku 5.5.1

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.4 funkcją liniową:

$$H_{w2} = -0,119 \cdot (V_{w1}) + 1482,3$$

$$R^2 = 0,9284$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.4 funkcją kwadratową:

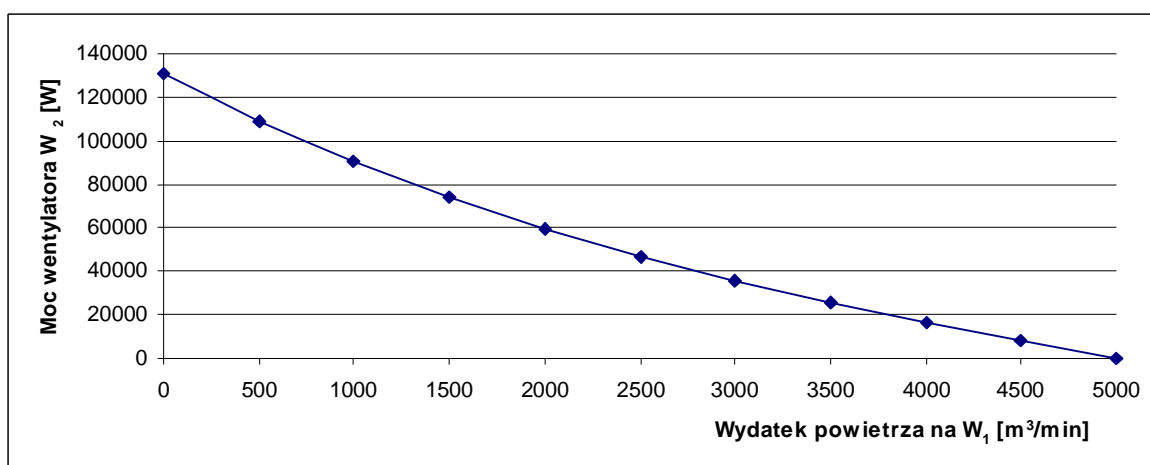
$$H_{w2} = 0,000024 \cdot (V_{w1})^2 - 0,237 \cdot (V_{w1}) + 1570,797$$

$$R^2 = 0,999906$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.4 wielomianem trzeciego stopnia:

$$H_{w2} = -0,000000001 \cdot (V_{w1})^3 + 0,0000274 \cdot (V_{w1})^2 - 0,244 \cdot (V_{w1}) + 1573,058$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.5. Wykres zależności mocy wentylatora W_2 od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W_1 dla sieci z rysunku 5.5.1.

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.5 funkcją liniową:

$$N_{u,w2} = -25,472 \cdot (V_{w1}) + 118021$$

$$R^2 = 0,9731$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.5 funkcją kwadratową:

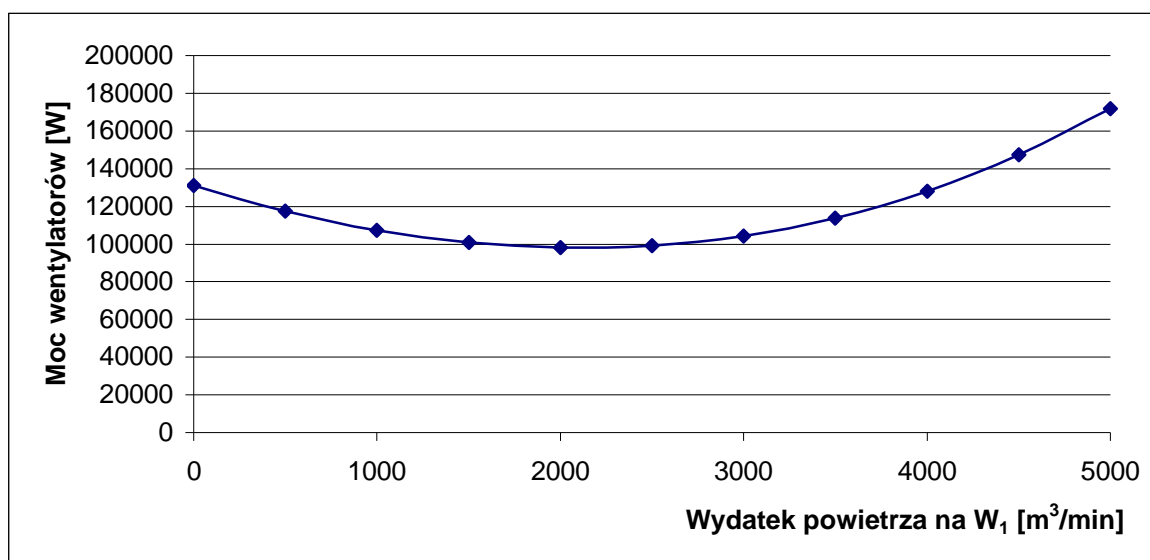
$$N_{u,w2} = 0,003 \cdot (V_{w1})^2 - 40,359 \cdot (V_{w1}) + 129186$$

$$R^2 = 0,9991$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.5 wielomianem trzeciego stopnia:

$$N_{u,w2} = -0,00000042 \cdot (V_{w1})^3 + 0,00613714 \cdot (V_{w1})^2 - 46,38379314 \cdot (V_{w1}) + 131082,13461538$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.6. Wykres zależności sumarycznej mocy wentylatorów W₁ i W₂ od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W₁ dla sieci z rysunku 5.5.1

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.6 funkcją liniową:

$$N_u = 7,535 \cdot (V_{w1}) + 101079$$

$$R^2 = 0,2927$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.6 funkcją kwadratową:

$$N_u = 0,0084 \cdot (V_{w1})^2 - 34,349 \cdot (V_{w1}) + 132493$$

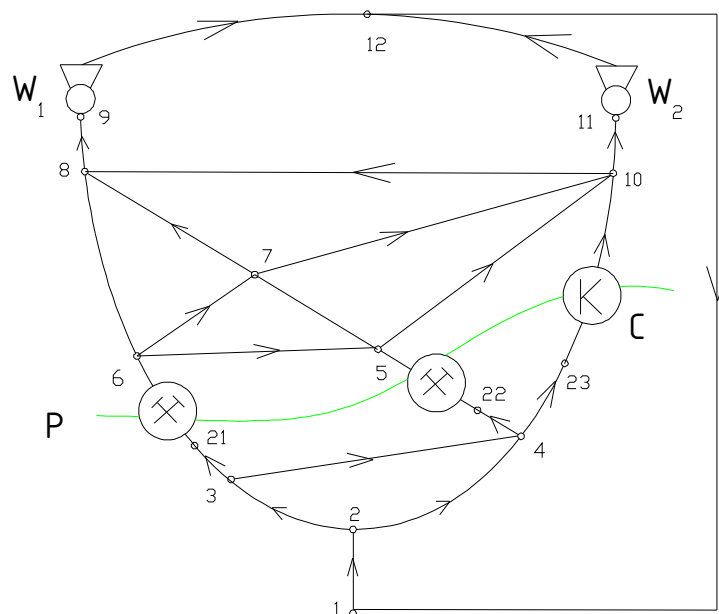
$$R^2 = 0,9981$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.6 wielomianem trzeciego stopnia:

$$N_u = 0,00000032 \cdot (V_{w1})^3 + 0,00594 \cdot (V_{w1})^2 - 29,707 \cdot (V_{w1}) + 131031,852$$

$$R^2 = 1$$

Przeprowadzone zostały również obliczenia rozplywu wymuszonego powietrza przy zastosowaniu podmetody regulacji ujemnej. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej dla tych obliczeń został przedstawiony na rysunku 5.5.7.



Rys. 5.5.7. Schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej – regulacja ujemna

Informacje o bocznicach sieci wentylacyjnej z rysunku 5.5.7 oraz zadane wydatki zostały umieszczone w tablicy 5.5.4.

Tab. 5.5.4.

Dane wejściowe o sieci wentylacyjnej z rys. 5.5.7.

Numer bocznicy	Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznicy [mBd]	Zadany wydatek [m ³ /min]
1	3	21	?	2300
2	21	6	100	-
3	4	22	?	1200
4	22	5	150	-
5	4	23	?	1500
6	23	10	75	-
7	1	2	80	-
8	2	3	120	-
9	2	4	50	-
10	3	4	25	-
11	5	6	80	-
12	5	7	45	-
13	5	10	125	-
14	6	7	40	-
15	6	8	65	-

Numer bocznicy	Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznicy [mBd]	Zadany wydatek [m ³ /min]
16	7	8	150	-
17	7	10	120	-
18	8	9	45	-
19	8	10	10	-
20	10	11	60	-
21	9	12	0	-
22	11	12	0	-
23	12	1	0	-

? – oznacza, że w danych wejściowych zostaje wprowadzona wartość 0 oporu bocznicy, natomiast wyznaczona w obliczeniach wartość będzie oporem tamy regulacyjnej.

Tab. 5.5.5.
Wyniki obliczeń rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej dla sieci z rysunku 5.5.7

ms-301 siec przekatna 2 wentylatory 3 odbiory do optymalizacji funkcj Nu=f(V) re
bocznic : 23 wezlow : 15 maks. wartosc wezla : 23 wentylatorow : 0
plik wej.:ms-301b dnia: 2007.01.29. godzina: 19:26

Numer bocznicy	Wezly bocznicy		Opor (mBd)	Wydatek powietrza (m3/min) (m3/s)		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
1	3	21	0.000	2300.00	38.3333	0.000	126.811
2	21	6	100.000	2300.00	38.3333	146.944	0.000
3	4	22	0.000	1200.00	20.0000	0.000	37.307
4	22	5	150.000	1200.00	20.0000	60.000	0.000
5	4	23	0.000	1500.00	25.0001	0.000	0.000
6	23	10	75.000	1500.00	25.0001	46.875	0.000
7	1	2	80.000	5000.00	83.3333	555.556	0.000
8	2	3	120.000	1965.03	32.7504	128.711	0.000
9	2	4	50.000	3034.98	50.5829	127.932	0.000
10	3	4	25.000	-334.97	-5.5829	-0.779	0.000
11	5	6	80.000	-283.04	-4.7174	-1.780	0.000
12	5	7	45.000	648.50	10.8084	5.257	0.000
13	5	10	125.000	834.54	13.9089	24.182	0.000
14	6	7	40.000	795.84	13.2639	7.037	0.000
15	6	8	65.000	1221.12	20.3520	26.923	0.000
16	7	8	150.000	690.84	11.5140	19.886	0.000
17	7	10	120.000	753.50	12.5583	18.925	0.000
18	8	9	45.000	2500.00	41.6667	78.125	0.000
19	8	10	10.000	-588.04	-9.8007	-0.961	0.000
20	10	11	60.000	2500.00	41.6667	104.167	0.000
21	9	12	0.000	2500.00	41.6667	0.000	809.448
22	11	12	0.000	2500.00	41.6667	0.000	834.529
23	12	1	0.000	5000.00	83.3333	0.000	0.000

Z E S T A W I E N I E					P O T E C J A L O W				
K O P A L N I A N E J					S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-556	-684	-683	-706	-704	-711	-731	-809	-730
11	12	21	22	23					
-835	0	-557	-646	-683					

W tablicy 5.5.5 pokazane zostały wartości wydatków powietrza oraz żądane spiętrzenia wentylatorów głównych i pomocniczych, przy równomiernym wydatku powietrza na wentylatorach głównych. Wykonano również obliczenia rozplywu wymuszonego dla różnych zadanych wartości wydatków powietrza na wentylatorze pierwszym W_1 przy regulacji ujemnej. Najważniejsze wyniki dla każdego z rozwiązań zostały zebrane w tablicy 5.5.6.

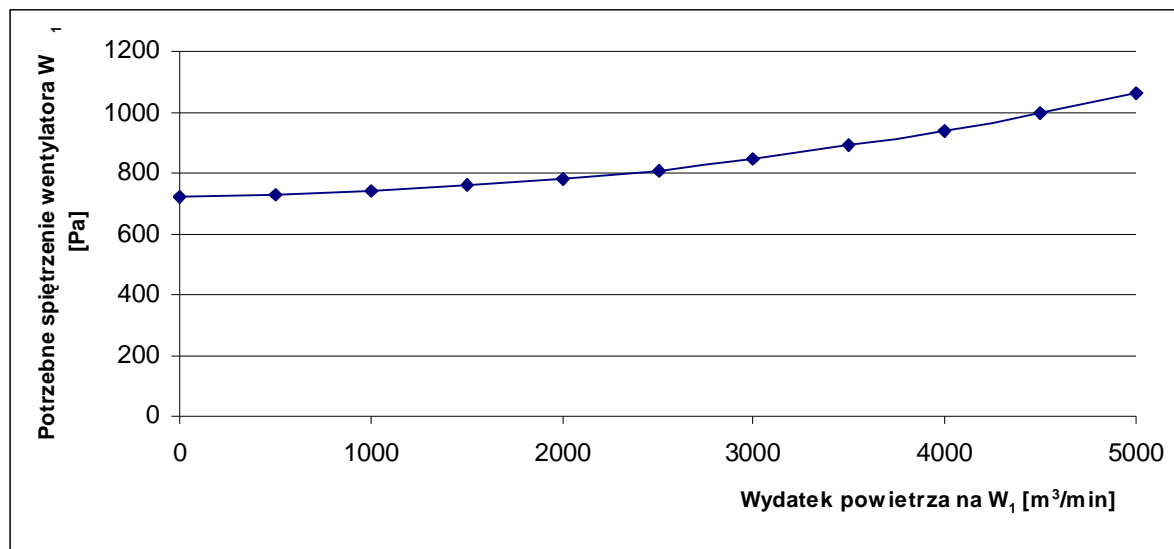
Tab. 5.5.6.

Wyniki obliczeń parametrów wentylatorów głównych i pomocniczych według 11 wariantów rozplywu wymuszonego dla regulacji ujemnej w sieci z rys. 5.5.7.

Wariant rozplywu	Wydatek powietrza na wentylatorze W_1 [m ³ /min] wartości przyjmowane	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W_1 [Pa]	Moc wentylatora W_1 [W]	Wydatek powietrza na wentylatorze W_2 [m ³ /min]	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W_2 [Pa]	Moc wentylatora W_2 [W]
1	0	721	0	5000	1147	95586
2	500	729	6073	4500	1068	80090
3	1000	741	12347	4000	997	66469
4	1500	758	18952	3500	935	54514
5	2000	780	26013	3000	880	44018
6	2500	809	33727	2500	835	34772
7	3000	846	42296	2000	797	26568
8	3500	890	51897	1500	768	19196
9	4000	941	62704	1000	747	12450
10	4500	999	74888	500	735	6121
11	5000	1063	88617	0	730	0

Wariant rozplywu	Potrzebne spiętrzenie wentylatora pomocniczego I [Pa]	Moc wentylatora pomocniczego I [W]	Potrzebne spiętrzenie wentylatora pomocniczego II [Pa]	Moc wentylatora pomocniczego II [W]	Całkowita moc wentylatorów [W]
1	132	5073	42	840	101499
2	130	4988	40	802	91953
3	128	4927	38	775	84518
4	127	4891	37	759	79116
5	127	4881	37	755	75667
6	126	4861	37	746	74106
7	125	4816	36	726	74405
8	123	4751	34	697	76542
9	121	4670	33	661	80486
10	119	4579	30	619	86207
11	116	4481	28	575	93673

Następnie dokonano aproksymacji potrzebnych spięrzeń wentylatorów głównych od wydatku na wentylatorze pierwszym oraz całkowitej mocy wentylatorów od wydatku na wentylatorze pierwszym funkcjami liniowymi, parabolicznymi oraz wielomianami trzeciego stopnia. Podano również wartości R^2 , dla każdej z aproksymacji.



Rys. 5.5.8. Wykres zależności pomiędzy potrzebnym spięzieniem wentylatora W_1 , a wydatkiem powietrza przepływającego przez niego dla sieci z rysunku 5.5.7

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.8 funkcją liniową:

$$H_{w1} = 0,0675 \cdot (V_{w1}) + 674,58$$

$$R^2 = 0,9299$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.8 funkcją kwadratową:

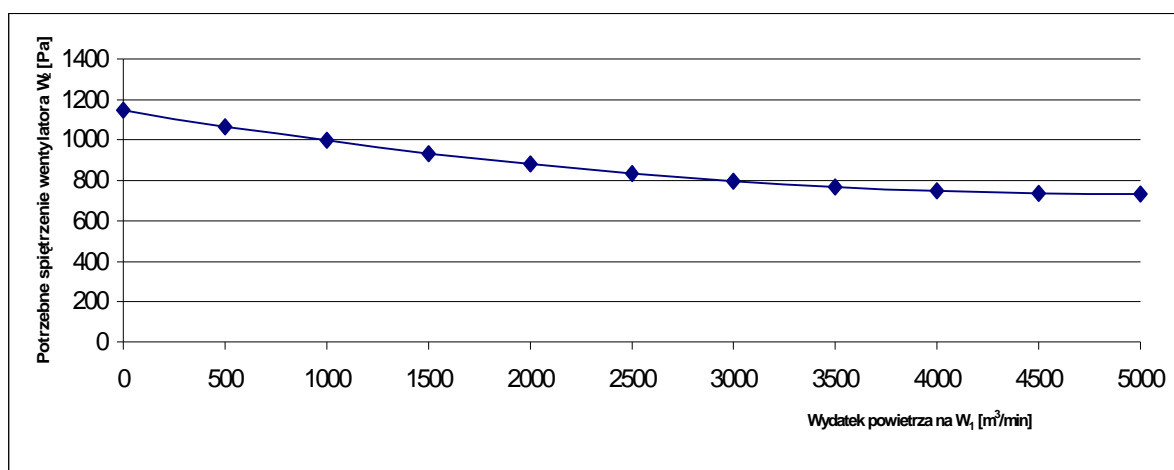
$$H_{w1} = 0,0000133 \cdot (V_{w1})^2 + 0,00123 \cdot (V_{w1}) + 724,306$$

$$R^2 = 0,9998369$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.8 wielomianem trzeciego stopnia:

$$H_{w1} = 0,0000000004 \cdot (V_{w1})^3 + 0,00000992 \cdot (V_{w1})^2 + 0,0076 \cdot (V_{w1}) + 722,3$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.9. Wykres zależności pomiędzy ciśnieniem wentylatora W_2 , a wydatkiem powietrza przepływającego przez wentylator W_1 dla sieci z rysunku 5.5.7

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.9 funkcją liniową:

$$H_{w2} = -0,0833 \cdot (V_{w1}) + 1084,5$$

$$R^2 = 0,9276$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.9 funkcją kwadratową:

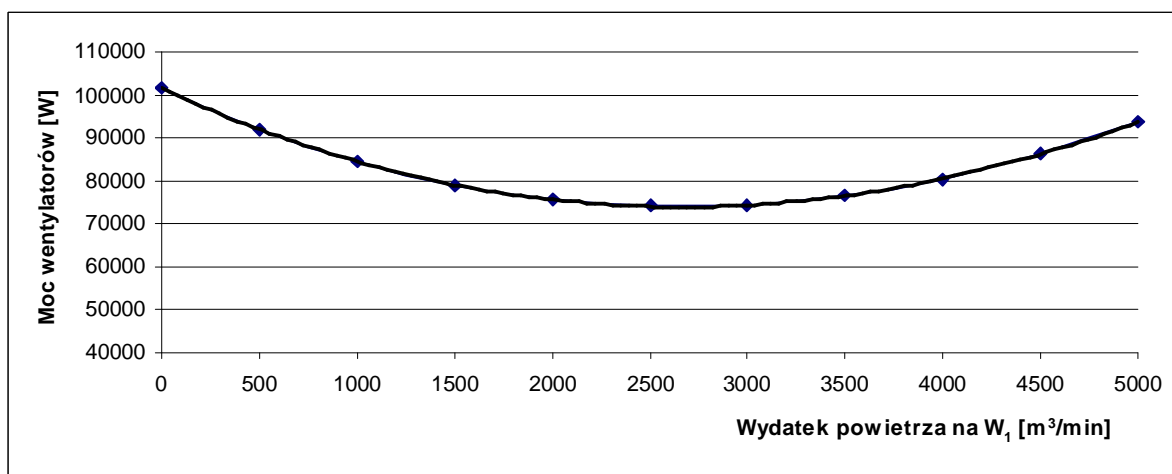
$$H_{w2} = 0,0000167 \cdot (V_{w1})^2 - 0,167 \cdot (V_{w1}) + 1147,029$$

$$R^2 = 1$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.9 wielomianem trzeciego stopnia:

$$H_{w2} = 0 \cdot (V_{w1})^3 + 0,0000167 \cdot (V_{w1})^2 - 0,167 \cdot (V_{w1}) + 1147,029$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.10. Wykres zależności sumarycznej mocy wentylatorów W_1 i W_2 od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W_1 dla sieci z rysunku 5.5.7.

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.10 funkcją liniową:

$$N_u = -1,4658 \cdot (V_{w1}) + 87135$$

$$R^2 = 0,0724$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.10 funkcją kwadratową:

$$N_u = 0,00376 \cdot (V_{w1})^2 - 20,2509 \cdot (V_{w1}) + 101223,962$$

$$R^2 = 0,9996472$$

Aproksymacja zależności pokazanej na rys. 5.5.10 wielomianem trzeciego stopnia:

$$N_u = -0,000000054 \cdot (V_{w1})^3 + 0,00416 \cdot (V_{w1})^2 - 21,023 \cdot (V_{w1}) + 101466,825$$

$$R^2 = 1$$

Analiza wyżej przedstawionych przykładów pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- aproksymacja funkcjami liniowymi zależności potrzebnych spiętrzeń projektowanych wentylatorów głównych od wydatku powietrza przez jeden z tych wentylatorów jest dosyć dokładna, jednakże dla zależności całkowitej mocy wentylatorów od wydatku powietrza, aproksymacja liniowa jest niewystarczająca,
- wykorzystanie aproksymacji funkcją kwadratową wyżej wymienionych zależności wydaje się być wystarczającą dokładne (wartości współczynnika R^2 mieszczą się w granicach 0,99 – 1). Wniosek ten jest również prawdziwy dla aproksymacji wielomianem trzeciego stopnia,
- powyższe wnioski potwierdzają się zarówno przy regulacji podmetodą dodatnią jak i ujemną.

W dalszych obliczeniach zdecydowano się ze względu na wystarczającą dokładność na zastosowanie aproksymacji wspomnianych zależności funkcją kwadratową. Dla takiej aproksymacji wystarczające jest wyznaczenie trzech różnych rozpływów powietrza w strefie zużytej (możliwych dzięki występowaniu prądów „międzysystemowych”), wyznaczenie potrzebnych parametrów punktów pracy wentylatorów głównych oraz nastaw regulatorów, oraz końcowo całkowitej mocy tych wentylatorów. Znając trzy różne warianty rozplywu wymuszonego, możliwe jest uzyskanie zależności typu:

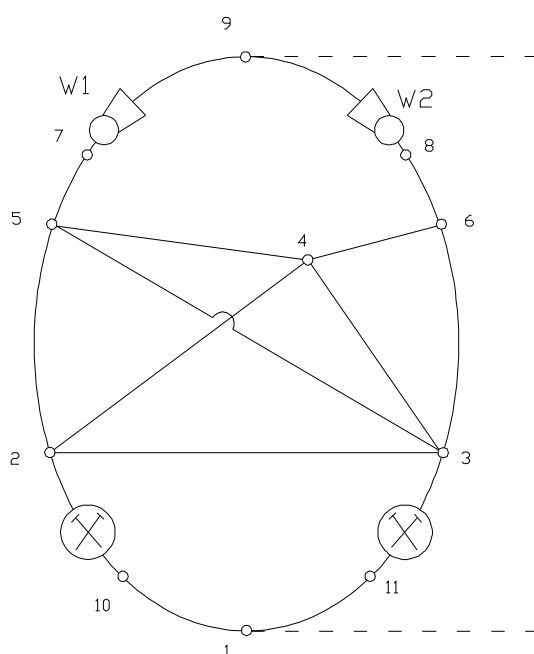
$$H_i = a \cdot (V_{w1})^2 + b \cdot (V_{w1}) + c \quad [5.5.1]$$

$$N_u = a \cdot (V_{w1})^2 + b \cdot (V_{w1}) + c \quad [5.5.2]$$

po uprzednim wyznaczeniu współczynników a , b oraz c .

Znalezienie minimalnej całkowitej mocy wentylatorów po uzyskaniu zależności określonej wzorem 5.5.2, spełniające zadane warunki rozplywu wymuszonego, wiąże się

W celu porównania wyników uzyskanych wyżej wymienioną metodą z metodą złotego podziału (przedstawioną w poprzednim rozdziale pracy) dokonano poszukiwania minimum mocy wentylatorów obiema metodami dla sieci wentylacyjnej przedstawionej na rysunku 5.5.11. Dla obydwu metod zdecydowano na regulację przy użyciu wyłącznie tam regulacyjnych.



Wybrane parametry sieci wentylacyjnej przedstawionej na rysunku 5.5.11. zostały zebrane w tablicy 5.5.7.

Na podstawie uzyskanych wyników dokonano aproksymacji funkcją paraboliczną zależności $H_i = f(V_{w1})$ oraz $N_u = f(V_{w1})$.

Tab. 5.5.7.

Dane wejściowe o sieci wentylacyjnej z rys. 5.5.11.

Numer bocznicy	Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznicy [mBd]	Zadany wydatek [m ³ /min]
1	1	10	?	2000
2	10	2	400	-
3	1	11	?	3000
4	11	3	900	-
5	2	3	100	-
6	2	5	150	-
7	2	4	80	-
8	3	5	120	-
9	3	4	60	-
10	3	6	150	-
11	4	5	60	-
12	4	6	80	-
13	5	7	120	-
14	6	8	240	-
15	7	9	0	-
16	8	9	0	-
17	9	1	0	-

? – oznacza, że w danych wejściowych zostaje wprowadzona wartość 0 oporu bocznicy, natomiast wyznaczona w obliczeniach wartość będzie oporem tamy regulacyjnej.

Tab. 5.5.8.

Wyniki obliczeń parametrów wentylatorów głównych dla 3 wariantów rozplywu wymuszonego powietrza dla regulacji dodatniej – sieć z rysunku 5.5.11

Wydatek powietrza na wentylatorze W ₁ [m ³ /min] Wartość przyjmowana	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W ₁ [Pa]	Moc wentylatora W ₁ [W]	Wydatek powietrza na wentylatorze W ₂ [m ³ /min]	Potrzebne spiętrzenie wentylatora W ₂ [Pa]	Moc wentylatora W ₂ [W]	Całkowita moc wentylatorów [W]
0	2253	0	5000	4111	342629	342629
2500	2486	103620	2500	2724	113537	217157
5000	3165	263751	0	2258	0	263751

Aproksymacja funkcjami parabolicznymi:

$$H_{w1} = 0,128 \cdot (V_{w1})^2 + 0,247 \cdot (V_{w1}) + 2254$$

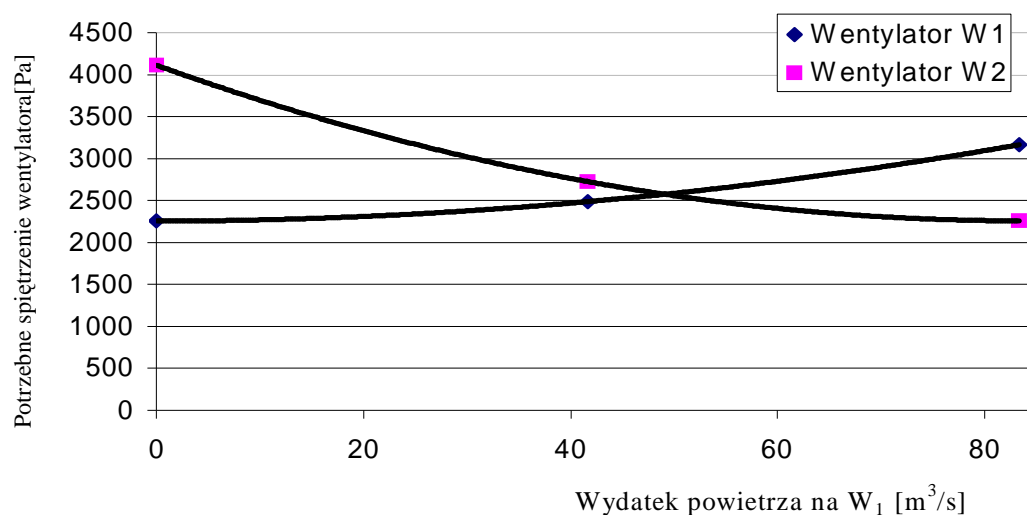
$$R^2 = 1$$

$$H_{w2} = 0,265 \cdot (V_{w1})^2 - 44,3 \cdot (V_{w1}) + 4111,6$$

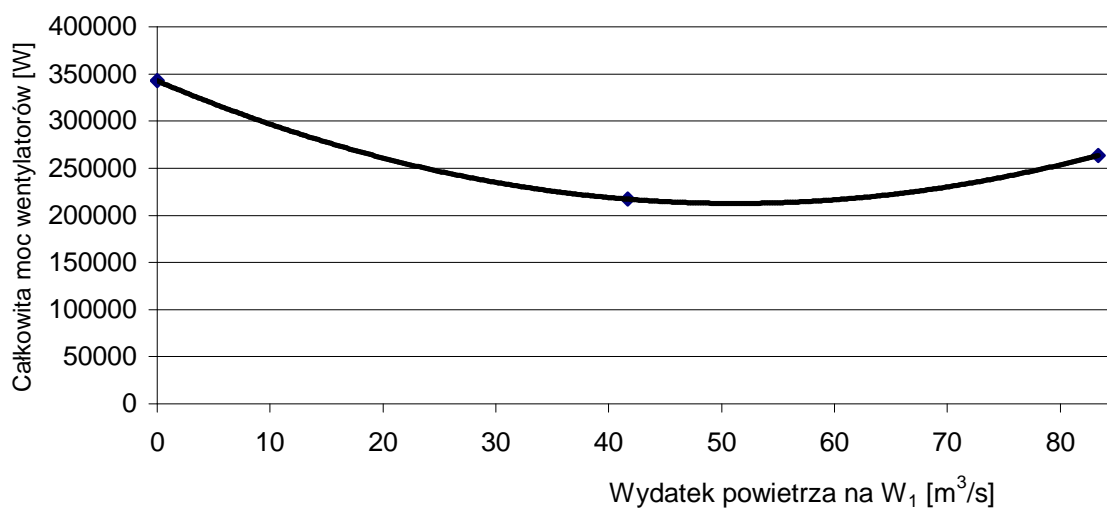
$$R^2 = 1$$

$$N_u = 49,555 \cdot (V_{w1})^2 - 5076,1 \cdot (V_{w1}) + 342629$$

$$R^2 = 1$$



Rys. 5.5.12. Wykres zależności pomiędzy spiężeniami wentylatorów W₁ oraz W₂, a wydatkiem powietrza przepływającego przez wentylator W₁ dla sieci z rysunku 5.5.11



Rys. 5.5.13. Wykres zależności sumarycznej mocy wentylatorów W₁ i W₂ od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W₁ dla sieci z rysunku 5.5.11

Następnie obliczono pierwszą pochodną funkcji mocy wentylatorów N_u względem zmiennej niezależnej wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym V_{w1} .

$$N_u' = 99,11 \cdot (V_{w1}) - 5076,1$$

Funkcja jednej zmiennej posiada ekstremum w punkcie, w którym wartość pierwszej pochodnej jest równa zeru:

$$99,11 \cdot (V_{w1}) - 5076,1 = 0$$

Rozwiązując równanie uzyskano

$$V_{w1} = 51,216 \text{ [m}^3/\text{s]} = 3073 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Przy założeniu wyznaczonego wydatku powietrza w bocznicy 7 – 9, dla regulacji dodatkowo uzyskano rozptyw powietrza oraz nastawy regulatorów jak w tabelicy 5.5.9.

Tab. 5.5.9.
Wyniki obliczeń rozptywu powietrza
w kopalnianej sieci wentylacyjnej dla sieci z rysunku 5.5.7.
– optimum wyznaczone z metody charakterystyki $Nu = f(v_{w1})$

ms-200 sieć przekątna 2 wentylatory 2 odbiory do funkcji $p(V)$
bocznica : 17 węzłów : 11 maks. wartość węzła : 11 wentylatorów : 0
plik wej.:ms-200a dnia: 2007.02.19. godzina: 19:13

Numer bocznicy	Węzły bocznicy	Opor (mBd)	Wydatek powietrza (m ³ /min)	Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
1	1 10	1624.710	2000.00	33.3333	1805.231
2	10 2	400.000	2000.00	33.3333	444.444
3	1 11	0.000	3000.00	50.0000	0.000
4	11 3	900.000	3000.00	50.0000	2250.000
5	2 3	100.000	108.25	1.8042	0.326
6	2 5	150.000	955.23	15.9205	38.019
7	2 4	80.000	936.52	15.6086	19.490
8	3 5	120.000	1063.39	17.7232	37.694
9	3 4	60.000	1072.33	17.8721	19.165
10	3 6	150.000	972.53	16.2089	39.409
11	4 5	60.000	1054.39	17.5731	18.529
12	4 6	80.000	954.46	15.9077	20.244
13	5 7	120.000	3073.01	51.2168	314.779
14	6 8	240.000	1926.99	32.1165	247.553
15	7 9	0.000	3073.01	51.2168	0.000
16	8 9	0.000	1926.99	32.1165	0.000
17	9 1	0.000	5000.00	83.3333	0.000

$Nu = 214768,679 \text{ [W]}$

Z E S T A W I E N I E P O T E C J A Ł O W K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y Ł A C Y J N E J

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-2250	-2250	-2269	-2288	-2289	-2602	-2537	0	-1805
11									
0									

Sumaryczna moc wentylatorów W_1 oraz W_2 wyniosła:

$$N_u = 214768 \text{ [W]}$$

W celu porównania powyższej metody z metodą wykorzystującą algorytm złotego podziału wykonano kolejne obliczenia. Przy wykorzystaniu metody złotego podziału (której algorytm przedstawiono w poprzednim rozdziale) ograniczono się do dopuszczalnego

przedziału niepewności $d_{\text{dop}} < 5 \text{ [m}^3/\text{s]}$. Wyniki dla kolejnych iteracji wynikających z metody złotego podziału przedstawiono w tablicy 5.5.10. Dla każdej iteracji w tablicy zapisano dwa wiersze. Wiersz górny odpowiada parametrom rozplywu powietrza odpowiadającemu prawemu krańcowi przedziału, zaś wiersz dolny odpowiada lewemu krańcowi przedziału. W kolejnych kolumnach znajdują się numer iteracji, zadany wydatek powietrza na wentylatorze pierwszym, potrzebne spiętrzenie wentylatora pierwszego, potrzebne spiętrzenie wentylatora drugiego, sumaryczna moc użyteczna obydwu wentylatorów oraz długość przedziału wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym w którym znajduje się minimum mocy użytecznej.

Tab. 5.5.10.

Minimalizacja mocy wentylatorów dla sieci z rys. 5.5.11 – metoda złotego podziału

Numer iteracji	V_{w1} m^3/s	H_{w1} Pa	H_{w2} Pa	N_u W	d_i m^3/s
0	83,3333	3165	2258	263751	
0	0	2253	4111	342628	
1	51,500	2606	2532	214831	51,50
1	31,833	2392	2968	229064	51,50
2	63,663	2788	2364	224047	31,83
2	51,500	2606	2532	214831	31,83
3	51,500	2606	2532	214831	19,67
3	43,993	2512	2674	215769	19,67
4	56,093	2670	2459	216805	12,16
4	51,500	2606	2532	214831	12,16
5	51,500	2606	2532	214831	7,52
5	48,573	2568	2584	214565	7,52
6	48,573	2568	2584	214565,	4,65
6	46,850	2546	2616	214784	4,65

Wiersz w których pogrubiono czcionkę odpowiadają nowemu krańcowi przedziału w każdej z iteracji.

Kształtowanie się krańców przedziałów w kolejnych iteracjach:

0	0,0000	-	83,333 $[\text{m}^3/\text{s}]$
I	31,833	-	83,333 $[\text{m}^3/\text{s}]$
II	31,833	-	63,663 $[\text{m}^3/\text{s}]$
III	43,993	-	63,663 $[\text{m}^3/\text{s}]$
IV	43,993	-	56,093 $[\text{m}^3/\text{s}]$
V	43,993	-	51,500 $[\text{m}^3/\text{s}]$
VI	46,850	-	51,500 $[\text{m}^3/\text{s}]$

Zgodnie z przedstawioną metodą ekstremum funkcji znajduje się w pobliżu środka ostatniego szóstego przedziału, czyli dla wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym wynoszącym $V_{w1} = 49,175 \text{ [m}^3/\text{s}] = 2950 \text{ [m}^3/\text{min}]$.

Przy założeniu wyznaczonego wydatku powietrza w bocznicy 7 – 9, dla regulacji dodatkowo uzyskano rozptyw powietrza oraz nastawy regulatorów jak w tablicy 5.5.11.

Tab. 5.5.11.
Wyniki obliczeń rozptywu powietrza
w kopalnianej sieci wentylacyjnej dla sieci z rysunku 5.5.7.
– optimum wyznaczone z metody złotego podziału

ms-200 sieć przekątna 2 wentylatory 2 odbiory do funkcji p(V)

bocznica : 17 węzłów : 11 maks. wartość węzła : 11 wentylatorów : 0

Numer bocznicy	Węzły bocznicy	Opór (mBd)	Wydatek powietrza		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
			(m ³ /min)	(m ³ /s)		
1	1 10	1624.600	2000.00	33.3333	1805.110	0.000
2	10 2	400.000	2000.00	33.3333	444.444	0.000
3	1 11	0.000	3000.00	50.0000	0.000	0.000
4	11 3	900.000	3000.00	50.0000	2250.000	0.000
5	2 3	100.000	126.68	2.1113	0.446	0.000
6	2 5	150.000	929.89	15.4982	36.029	0.000
7	2 4	80.000	943.43	15.7238	19.779	0.000
8	3 5	120.000	1033.20	17.2199	35.583	0.000
9	3 4	60.000	1077.03	17.9506	19.333	0.000
10	3 6	150.000	1016.45	16.9408	43.049	0.000
11	4 5	60.000	987.41	16.4569	16.250	0.000
12	4 6	80.000	1033.05	17.2175	23.715	0.000
13	5 7	120.000	2950.50	49.1750	290.182	0.000
14	6 8	240.000	2049.50	34.1583	280.030	0.000
15	7 9	0.000	2950.50	49.1750	0.000	2575.765
16	8 9	0.000	2049.50	34.1583	0.000	2573.079
17	9 1	0.000	5000.00	83.3333	0.000	0.000

Nu = 214555,248 [W]

Z E S T A W I E N I E P O T E C J A Ł O W K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y Ł A C Y J N E J

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-2250	-2250	-2269	-2286	-2293	-2576	-2573	0	-1805
11									
0									

Sumaryczna moc wentylatorów W₁ oraz W₂ wyniosła:

N_u = 214555 [W]

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że różnice dla obydwu metod kształtują się następująco:

– proponowany optymalny wydatek powietrza na wentylatorze W₁

metoda charakterystyki N_u = f(V_{w1}):

V_{w1} = 51,216 [m³/s] = 3073,009 [m³/min],

metoda złotego podziału:

V_{w1} = 49,175 [m³/s] = 2950,5 [m³/min].

Różnica pomiędzy metodami wynosi 122,509 [m³/min], co stanowi 2,45% wydatku powietrza przepływającego przez przekrój całkowity przez sieć wentylacyjną.

- wyznaczona moc wentylatorów dla proponowanego wydatku

metoda charakterystyki $N_u = f(V_{w1})$:

$$N_u = 214768 \text{ [W]},$$

metoda złotego podziału:

$$N_u = 214555 \text{ [W]}$$

Różnica pomiędzy metodami wynosi 213 W, co stanowi około 0,1% mocy wentylatorów uzyskanej w obydwu metodach.

5.6. Szczególne rodzaje sieci wentylacyjnych dla których można zastosować metody złotego podziału lub charakterystyki zastępczej

Przedstawione w poprzednich rozdziałach metody złotego podziału oraz wykorzystania charakterystyk zastępczych mają zastosowanie, jak wykazano wcześniej, w sieciach wentylacyjnych z dwoma wentylatorami głównymi, w których występują połączenia podsieci tych wentylatorów za pomocą tzw. „prądów międzysystemowych” lub węzła łączącego te podsieci. Istnieją jednak pewne szczególne rodzaje sieci wentylacyjnych o większej liczbie wentylatorów głównych, w których wspomniane metody znajdują zastosowanie. Takie sieci wentylacyjne mogą posiadać dowolną liczbę tych wentylatorów, lecz musi zostać spełniona następująca właściwość: niektóre podsieci wentylatorów głównych mogą być połączone maksymalnie parami oraz mogą występować podsieci nie połączone z żadnymi innymi podsieciami wentylatorów głównych. Rozpatrując sieć wentylacyjną z czterema wentylatorami głównymi W_1 , W_2 , W_3 , W_4 szczególnymi rodzajami w których można zastosować wspomniane metody są sieci wentylacyjne w których:

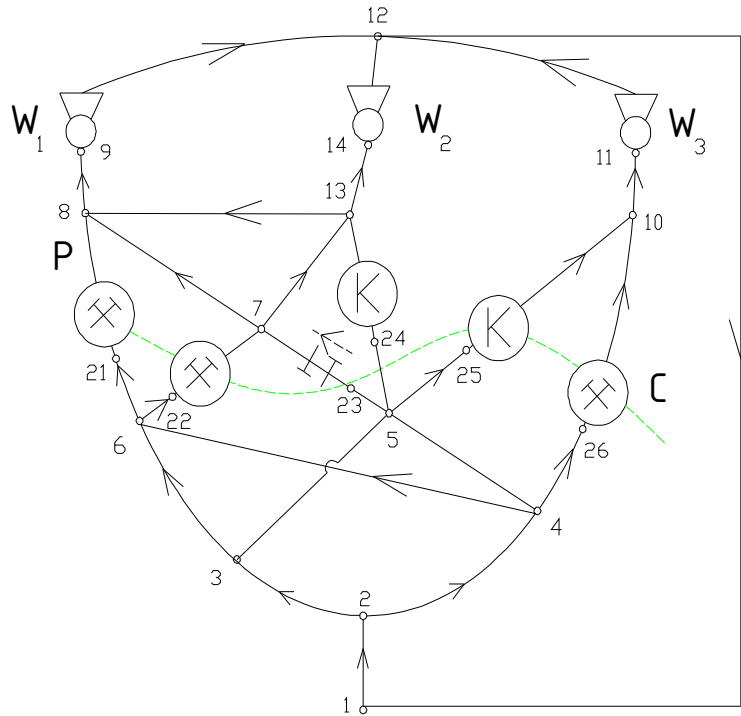
- można wydzielić jedną z następujących par (W_1, W_2) , (W_1, W_3) , (W_1, W_4) , (W_2, W_3) , (W_2, W_4) (W_3, W_4) dla których podsieci wentylatorów głównych występujących w parze są połączone prądami zużyтыми „międzysystemowymi”, a podsieci pozostałych dwóch wentylatorów nie łączą się z jakąkolwiek inną podsiecią wentylatorów głównych,

- wentylatory główne można rozdzielić na dwie pary np. (W_1, W_2) oraz (W_3, W_4) dla których to par istnieją połączenie pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych występujących w parze.

Należy zauważyć, że w przypadku gdy podsieci przynajmniej trzech wentylatorów np. W_1, W_2, W_3 są połączone między sobą, z wcześniej przedstawionych metod nie da się skorzystać lub jest to utrudnione dla metody wykorzystującej zależność sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów od wydatku powietrza przepływającego przez wentylator główny. Wynika to z następującej właściwości struktury sieci wentylacyjnej: dla sieci z dwoma wentylatorami głównymi przyjmowany wydatek powietrza na jednym z wentylatorów głównych pozwala na jednoznaczne wyznaczenie rozplywu powietrza w strefie świeżego i zużytego powietrza, a w dalszej kolejności nastaw regulatorów. Dla sieci z trzema wentylatorami głównymi połączonymi wzajemnie prądami „międzysystemowymi” przyjęcie wydatku powietrza tylko na jednym z wentylatorów głównych nie rozstrzyga jednoznacznie o rozplywie powietrza w sieci wentylacyjnej.

W strefie zużytej podsieci wentylatora głównego oddzielonej od pozostałych podsieci, wydatki powietrza zadane w bocznicach należących do przekroju całkowitego determinują rozplyw powietrza w tejże strefie. Trudność wyznaczenia rozplywu będzie zależała od występowania zużytych prądów zależnych we wspomnianej podsieci. Dla dwóch podsieci wentylatorów głównych które są połączone między sobą można przy wykorzystaniu jednej z wymienionych wcześniej metod (rozdział 5.4 lub 5.5) znaleźć najkorzystniejszy rozplyw powietrza w strefie zużytej ze względu na całkowitą moc wentylatorów głównych. Jeżeli w sieci wentylacyjnej da się wydzielić więcej par podsieci połączonych między sobą, to dla każdej z tych par należy wyznaczyć najkorzystniejszy rozplyw.

Dla lepszego zilustrowania zagadnienia przedstawiony zostanie na rysunku 5.6.1. schemat kanoniczny sieci wentylacyjnej dla której można zastosować wspomniane metody.



Rys. 5.6.1. Szczególny rodzaj sieci wentylacyjnej dla której istnieje możliwość zastosowania metod jak dla sieci z dwoma wentylatorami głównymi.

W sieci wentylacyjnej z rysunku 5.6.1 występują trzy wentylatory główne W_1 , W_2 , W_3 . Bocznice należące do przekroju całkowitego można rozdzielić na dwie grupy $\{25 - 10, 26 - 10\}$ oraz $\{21 - 8, 22 - 7, 23 - 7, 24 - 13\}$. Powietrze zużyte z pierwszej grupy bocznic płynie wyłącznie do wentylatora W_3 , natomiast powietrze z drugiej grupy bocznic płynie do wentylatorów W_1 oraz W_2 . Dlatego podsieć wentylatora W_3 nie jest połączona z podsieciami wentylatorów W_1 lub W_2 . Na podstawie narzuconego wydatku powietrza w bocznicach $25 - 10$ oraz $26 - 10$ możliwym staje się natychmiastowe wyznaczenie wydatku powietrza płynącego przez wentylator W_3 (szczególnie proste z powodu braków prądów zależnych w strefie zużytej w podsieci wentylatora W_3). Najkorzystniejszy rozdział powietrza zużytego płynącego z bocznic należących do drugiej grupy pomiędzy wentylatorami W_1 oraz W_2 można znaleźć przy wykorzystaniu wcześniej pokazanych metod. Warto zauważyć, iż w momencie gdy węzły 10 oraz 13 zostałyby połączone bocznicie skorzystanie z wymienionych metod okazałoby się niemożliwe.

5.7 Wrażliwość wydatku powietrza w bocznicy na zmiany wydatku powietrza w innych bocznicach

W literaturze [32, 74] dostrzeżono wagę wpływu zmiany oporu bocznicy na zmianę rozplywu powietrza w całej sieci wentylacyjnej. Zmiana taka mogłaby być uzyskiwana dzięki celowym działaniom lub powstawałaby przypadkowo, na wskutek np. awarii urządzeń wentylacyjnych. Obliczenia takie przeprowadzano głównie dla zagadnienia rozwiązywania sieci wentylacyjnej (rozplywu nieskrępowanego). W praktyce uzyskiwane dzięki nim informacje pozwalałyby na wcześniejsze wypracowanie sposobów postępowania dla sytuacji możliwych do wystąpienia w przyszłości.

Przy zagadnieniach obliczenia rozplywu wymuszonego szczególnie interesującym wydaje się być zastosowanie wrażliwości wydatków powietrza w i-tej bocznicy na zmianę wydatku powietrza w bocznicy r-tej. Przy tzw. regulacji sieci, oprócz wrażliwości wydatków powietrza, występowałyby również wrażliwości nastaw regulatorów, czyli odpowiednio wrażliwości potrzebnych spiętrzeń wentylatorów oraz wrażliwości tam regulacyjnych na zmiany wydatku powietrza w bocznicy r-tej. Znajomość tych wielkości ułatwiałaby podejmowanie decyzji na który z wentylatorów głównych należy skierować większą ilość powietrza, aby zmniejszyć zużycie ich mocy. Wrażliwość układu jaki stanowi sieć wentylacyjna na zmianę wydatku powietrza w pewnej bocznicy, może okazać się również cenna w zagadnieniach związanych z tematyką obliczania rozplywu naturalnego.

Dla ustalonego stanu sieci wentylacyjnej spełnione są równania Kirchhoffa (wzory 3.2.3. oraz 3.2.4.). Powstanie zmiany wydatku powietrza dV_r w r-tej bocznicy powoduje zmiany wydatków powietrza oraz zmiany spadów i przyrostów naporu w całej sieci. Rozplyw powietrza po zmianie musi spełniać wyżej wymienione prawa, co można zapisać następującymi zależnościami:

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \cdot (V_i + dV_i) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad [5.7.1]$$

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot (W_i + dW_i) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [5.7.2]$$

Powoduje to (przy znanym rozplywie w sieci spełniającym prawa równowagi) z kolei, że zmiany również muszą odpowiednio spełniać prawa Kirchhoffa:

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \cdot dV_i = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad [5.7.3]$$

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot dW_i = 0 \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [5.7.4]$$

Znając charakterystykę i-tej bocznicy można uzyskać zależność łączącą różniczkę wydatku powietrza oraz różniczkę spadku lub przyrostu naporu w rozpatrywanej bocznicy. Dla zagadnienia przepływu wymuszonego bocznicę można podzielić na następujące grupy:

- I. bocznicę o oporze R_i bez zainstalowanych tam regulacyjnych i wentylatorów:
charakterystyka bocznicy określa zależność

$$W_i = R_i \cdot V_i \cdot |V_i| \quad [5.7.5]$$

po zróżniczkowaniu

$$dW_i = 2 \cdot R_i \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} \cdot dV_r \quad [5.7.6]$$

- II. bocznicę z tamami regulacyjnymi o oporze R_{tr} :
charakterystyka bocznicy określa zależność

$$W_i = R_{tr} \cdot V_i \cdot |V_i| \quad [5.7.7]$$

po zróżniczkowaniu

$$dW_i = (V_i)^2 \cdot \frac{dR_{tr}}{dV_r} \cdot dV_r + 2 \cdot R_{tr} \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} \cdot dV_r \quad [5.7.8]$$

- III. bocznicę z wentylatorami:
charakterystyka bocznicy

$$W_i = -H_i + R_i \cdot V_i \cdot |V_i| \quad [5.7.9]$$

po zróżniczkowaniu

$$dW_i = -\frac{dH_i}{dV_r} \cdot dV_r + 2 \cdot R_i \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} \cdot dV_r \quad [5.7.10]$$

Zmienną niezależną dla tak postawionego problemu jest wydatek powietrza V_r . Układ równań (5.7.3 oraz 5.7.4) po uwzględnieniu zależności (5.7.6, 5.7.8 oraz 5.7.10) jest prawdziwy również dla pochodnych $\frac{dV_i}{dV_r}$ oraz $\frac{dW_i}{dV_r}$. Można go zapisać w następującej formie:

$$\sum_{i=1}^m s_{ji} \cdot \frac{dV_i}{dV_r} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad [5.7.11]$$

$$\sum_{i=1}^m c_{ki} \cdot \frac{dW_i}{dV_r} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, v \quad [5.7.12]$$

$$\frac{dW_i}{dV_r} = \begin{cases} 2 \cdot R_i \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} & \text{dla bocznic bez regulatorów} \\ (V_i)^2 \cdot \frac{dR_{tr}}{dV_r} + 2 \cdot R_{tr} \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} & \text{dla bocznic z tamami regulacyjnymi} \\ -\frac{dH_i}{dV_r} + 2 \cdot R_i \cdot |V_i| \cdot \frac{dV_i}{dV_r} & \text{dla bocznic z wentylatorami} \end{cases} \quad [5.7.13]$$

W przedstawionym układzie równań wartościami znanymi są wszystkie opory bocznic R_i , opory tam regulacyjnych R_{tr} oraz wydatki powietrza V_i dla aktualnego rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej. Wartościami niewiadomymi są natomiast pochodne $\frac{dV_i}{dV_r}$, $\frac{dW_i}{dV_r}$, $\frac{dR_{tr}}{dV_r}$ oraz $\frac{dH_i}{dV_r}$. Wszystkie niewiadome występują w pierwszej potędze – układ równań jest liniowy. Po uwzględnieniu zależności (5.7.13) we wzorach (5.7.11 i 5.7.12) oraz przy założeniu, że przed każdą bocznicą należącą do przekroju całkowitego będzie znajdowała się bocznica z regulatorem (w postaci tamy regulacyjnej lub wentylatora pomocniczego) liczba niewiadomych będzie wynosić:

$$2 \cdot l_{pc} + 2 \cdot l_w + m - l_{pc} - l_w + m = 2m + l_{pc} + l_w$$

Liczba równań (wynikających ze zależności 5.7.11, 5.7.12 i 5.7.13) natomiast wynosi:

$$n - 1 + v + m = n - 1 + m - n + 1 + m = 2m$$

i jest mniejsza od liczby niewiadomych.

Dla zagadnienia rozplywu wymuszonego można narzucić dodatkowe warunki dotyczące niektórych niewiadomych:

- warunek niezmienności wydatku powietrza dla bocznic należących do przekroju całkowitego:

$$\frac{dV_{i \in pc}}{dV_r} = 0 \quad [5.7.14a]$$

- warunek niezmienności nastawienia regulatora na drodze krytycznej:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{tr \in d_{kr}}}{dV_r} &= 0 \text{ dla bocznicy z tamą regulacyjną} \\ \text{lub} & \\ \frac{dH_{i \in d_{kr}}}{dV_r} &= 0 \text{ dla bocznicy z wentylatorem pomocniczym} \end{aligned} \quad [5.7.14b]$$

Liczba warunków wynikających z zależności (5.7.14a) wynosi l_{pc} , zaś z zależności (5.7.14b) wynosi 1 (wyjątkiem są tu sieci w których istnieje kilka dróg krytycznych

prowadzących do różnych wentylatorów głównych – efekt braku prądów „międzysystemowych”). Oczywiście:

$$\frac{dV_r}{dV_r} = 1 \quad [5.7.15]$$

czyli liczba dodatkowych warunków wynosi $l_{pc} + 2$.

Szczególnie przydatną, ze względu na zużycie mocy wentylatorów, jest informacja o wrażliwości wydatków powietrza w strefie zużytej na zmianę wydatku powietrza w bocznicach z wentylatorami głównymi.

Dla sieci wentylacyjnych z jednym wentylatorem głównym niemożliwe jest zastosowanie przedstawionej metody, ponieważ z założenia (5.7.14a) można stwierdzić, że dla dowolnego przekroju przez sieć wentylacyjną (w tym i przekroju przez wentylator główny) suma wskazanych wrażliwości jest równa zero. Wynika to z założenia stałych wydatków powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego. W przypadku gdy podsieci wentylatorów głównych nie są połączone prądami „międzysystemowymi”, wszystkie wskazane wrażliwości są równe zero przy uwzględnieniu założeń (5.7.14a oraz 5.7.14b), co przeczy założeniu 5.7.15. Dla sieci wentylacyjnych z dwoma wentylatorami głównymi, których podsieci są połączone w strefie zużytej, liczba równań liniowych wynikająca z układu równań (5.7.11, 5.7.12 i 5.7.13) oraz warunków dodatkowych (5.7.14 oraz 5.7.15) jest równa liczbie niewiadomych. Liczba niewiadomych wynosi:

$$2m + l_{pc} + l_w = 2m + l_{pc} + 2$$

Rozwiązanie otrzymanego układu równań jest możliwe za pomocą powszechnie znanych metod. Jeżeli liczba wentylatorów głównych jest większa niż 2 oraz nie występują sytuacje przedstawione w rozdziale 5.6, należy sprawdzić przypadki, gdy elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze i-tym przeniesie się w całości na wentylator j-ty. Przykładowo dla sieci wentylacyjnej z trzema wentylatorami głównymi, których podsieci są połączone prądami „międzysystemowymi” należy sprawdzić następujące warianty:

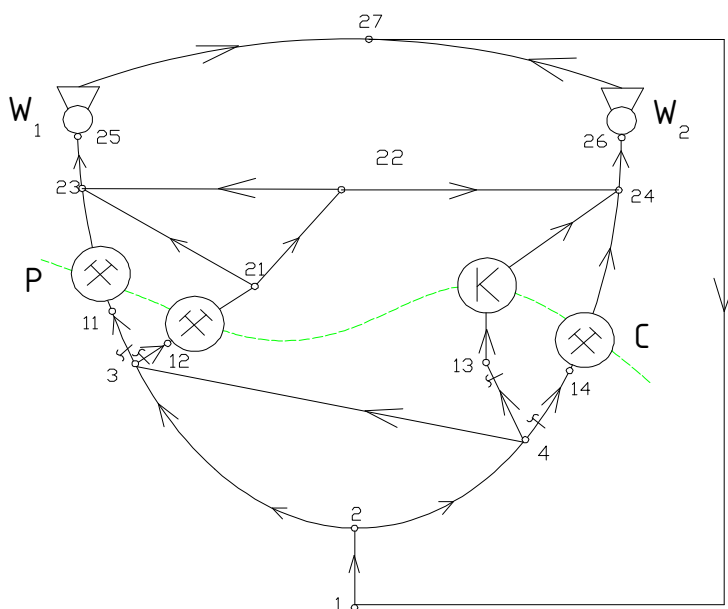
- elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze W_1 w całości przeniosła się na wentylator W_2 ,
- elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze W_1 w całości przeniosła się na wentylator W_3 ,
- elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze W_2 w całości przeniosła się na wentylator W_3

Ze względu na liniowy charakter układu równań nie jest konieczne badanie odwrotnego kierunku zmian. Liczba możliwych wariantów wynosi $\frac{l_w \cdot (l_w - 1)}{2}$.

Elementarną zmianę mocy wentylatorów powstałą na skutek zmiany wydatku powietrza na wentylatorze głównym, można wyznaczyć z zależności:

$$\frac{dN_u}{dV_r} = \sum_{i=1}^{l_w} \frac{dH_{wi}}{dV_r} \cdot V_{wi} + \frac{dV_{wi}}{dV_r} \cdot H_{wi} \quad [5.7.16]$$

Dla sieci z liczbą wentylatorów głównych wynoszącą przynajmniej 3, proponuje się aby w celu przejrzystości zapisu przyjąć oznaczenie $dV_{wi \rightarrow wj}$, który oznaczałby elementarną zmianę wydatku powietrza z wentylatora głównego W_i na wentylator główny W_j . Dla takich sieci wentylacyjnych należy zbadać wszystkie możliwe warianty. Wariant, w którym wartość elementarnej zmiany sumarycznej mocy wentylatorów jest najmniejsza będzie najkorzystniejszy. „Skierowanie” powietrza zgodnie z tym wariantem powinno spowodować największe korzyści tj. największe obniżenie mocy wentylatorów. Zgodnie z teorią programowania liniowego (rozdział 5.1) nie ma konieczności badania stanów „pośrednich”, czyli takich, w których elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze W_i rozkłada się częściowo na wentylatory W_j oraz W_k . Rozpatrywany wielościan wypukły utworzony z równań (5.7.11 – 5.7.15) na którym określona jest funkcja celu (5.7.16) będzie posiadał minimum w jednym z wierzchołków.



Rys. 5.7.1 Schemat sieci kanonicznej do obliczania wrażliwości wydatków powietrza oraz nastaw regulatorów

W celu lepszego zobrazowania zagadnienia zostanie pokazany przykład obliczeniowy. Dla prostej sieci wentylacyjnej przedstawionej na rysunku 5.7.1 wykonano obliczenia wrażliwości wydatku powietrza oraz nastaw regulatorów na zmianę wydatku powietrza w bocznicy 25 27.

W stanie aktualnym (bieżącym) wydatek powietrza zużytego został równomiernie rozłożony pomiędzy wentylatory główne W_1 oraz W_2 . Wymuszony rozpływ powietrza powinien zostać uzyskany wyłącznie za pomocą tam regulacyjnych. W tablicy 5.7.1 zostały zebrane wyniki rozpływu wymuszonego. Wartości oporów dla bocznic, w których umieszczone są tamy regulacyjne, są oporami tych tam (zaznaczonymi na czerwono). Droga przechodząca przez bocznicę 3 11 jest drogą krytyczną, dla której nastawa regulatora wynosi zero.

Tab 5.7.1.

Wyniki obliczeń rozpływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej – stan aktualny dla obliczeń wrażliwości sumarycznej mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W_1 z rys. 5.7.1

W Y N I K I O B L I C Z E N R O Z P L Y W U P O W I E T R Z A
W K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J
S T A N A K T U A L N Y D L A O B L I C Z E Ń W R A Ź L I W O Ś C I
S U M A R Y C Z N E J M O C Y W E N T Y L A T O R Ó W
N A Z M I A N Ę W Y D A T K U P O W I E T R Z A

ms-350 siec przekatna 2 wentylatory 4 odbiory do sprawdzenia kryterium wrazliwos
bocznic : 21 wezlow : 15 maks. wartosc wezla : 27 wentylatorow : 0
plik wej.:ms-350 dnia: 2007.03.18. godzina: 19:06

Numer bocznicy	Wezly bocznicy		Opor (mBd)	Wydatek powietrza		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
				(m3/min)	(m3/s)		
1	3	11	0.000	2000.00	33.3333	0.000	0.000
2	11	23	80.000	2000.00	33.3333	88.889	0.000
3	3	12	322.330	800.00	13.3334	57.304	0.000
4	12	21	160.000	800.00	13.3334	28.445	0.000
5	4	13	164.900	1199.99	19.9999	65.959	0.000
6	13	24	70.000	1199.99	19.9999	28.000	0.000
7	4	14	243.250	1000.00	16.6667	67.570	0.000
8	1	2	200.000	5000.00	83.3333	1388.889	0.000
9	2	3	120.000	2256.49	37.6082	169.725	0.000
10	2	4	80.000	2743.51	45.7252	167.263	0.000
11	4	3	30.000	543.51	9.0586	2.462	0.000
12	14	24	95.000	1000.00	16.6667	26.389	0.000
13	21	22	50.000	424.11	7.0685	2.498	0.000
14	21	23	80.000	375.90	6.2649	3.140	0.000
15	22	23	150.000	124.10	2.0684	0.642	0.000
16	22	24	130.000	300.01	5.0001	3.250	0.000
17	23	25	90.000	2500.00	41.6666	156.250	0.000
18	24	26	120.000	2500.00	41.6667	208.333	0.000
19	25	27	0.000	2500.00	41.6666	0.000	1803.752
20	26	27	0.000	2500.00	41.6667	0.000	1858.444
21	27	1	0.000	5000.00	83.3333	0.000	0.000

Nu = 152588,256 W

Z E S T A W I E N I E P O T E C J A Ł O W
K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J

1	2	3	4	11	12	13	14	21	22
0	-1389	-1559	-1556	-1559	-1616	-1622	-1624	-1644	-1647
23	24	25	26	27					
-1648	-1650	-1804	-1858	0					

Znając strukturę sieci wentylacyjnej oraz aktualny rozpływ powietrza przy wykorzystaniu wzorów (5.7.11 – 5.7.13) otrzymano następujący układ równań:

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad & \frac{dV_{1\ 2}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{2\ 3}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{2\ 4}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{b)} \quad & \frac{dV_{2\ 3}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{4\ 3}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{3\ 11}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{3\ 12}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{c)} \quad & \frac{dV_{2\ 4}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{4\ 3}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{4\ 13}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{4\ 14}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{d)} \quad & \frac{dV_{3\ 11}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{11\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{e)} \quad & \frac{dV_{3\ 12}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{12\ 21}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{f)} \quad & \frac{dV_{4\ 13}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{13\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{g)} \quad & \frac{dV_{4\ 14}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{14\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{h)} \quad & \frac{dV_{12\ 21}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{21\ 22}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{21\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{i)} \quad & \frac{dV_{21\ 22}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{22\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{22\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{j)} \quad & \frac{dV_{11\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{21\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{22\ 23}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{23\ 25}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{k)} \quad & \frac{dV_{13\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{14\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{22\ 24}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{24\ 26}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{l)} \quad & \frac{dV_{23\ 25}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{25\ 27}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{m)} \quad & \frac{dV_{24\ 26}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{26\ 27}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0 \\
 \text{n)} \quad & \frac{dV_{25\ 27}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} + \frac{dV_{26\ 27}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} - \frac{dV_{27\ 1}}{dV_{W1 \rightarrow W\ 2}} = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{o)} & 2 \cdot R_{23} \cdot |V_{23}| \cdot \frac{dV_{23}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{43} \cdot |V_{43}| \cdot \frac{dV_{43}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{24} \cdot |V_{24}| \cdot \frac{dV_{24}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{p)} & (V_{311})^2 \cdot \frac{dR_{tr311}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{311} \cdot |V_{311}| \cdot \frac{dV_{311}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{1123} \cdot |V_{1123}| \cdot \frac{dV_{1123}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - \\
& - 2 \cdot R_{2123} \cdot |V_{2123}| \cdot \frac{dV_{2123}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{1221} \cdot |V_{1221}| \cdot \frac{dV_{1221}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - (V_{312})^2 \cdot \frac{dR_{tr312}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{312} \cdot |V_{312}| \cdot \frac{dV_{312}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{q)} & 2 \cdot R_{2123} \cdot |V_{2123}| \cdot \frac{dV_{2123}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{2223} \cdot |V_{2223}| \cdot \frac{dV_{2223}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{2122} \cdot |V_{2122}| \cdot \frac{dV_{2122}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{r)} & (V_{312})^2 \cdot \frac{dR_{tr312}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{312} \cdot |V_{312}| \cdot \frac{dV_{312}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{2122} \cdot |V_{2122}| \cdot \frac{dV_{2122}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{2224} \cdot |V_{2224}| \cdot \frac{dV_{2224}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - \\
& - 2 \cdot R_{1324} \cdot |V_{1324}| \cdot \frac{dV_{1324}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - (V_{413})^2 \cdot \frac{dR_{tr413}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{413} \cdot |V_{413}| \cdot \frac{dV_{413}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + R_{43} \cdot |V_{43}| \cdot \frac{dV_{43}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{s)} & (V_{414})^2 \cdot \frac{dR_{tr414}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{414} \cdot |V_{414}| \cdot \frac{dV_{414}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{1424} \cdot |V_{1424}| \cdot \frac{dV_{1424}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - \\
& - 2 \cdot R_{1324} \cdot |V_{1324}| \cdot \frac{dV_{1324}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - (V_{413})^2 \cdot \frac{dR_{tr413}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{413} \cdot |V_{413}| \cdot \frac{dV_{413}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{t)} & 2 \cdot R_{2223} \cdot |V_{2223}| \cdot \frac{dV_{2223}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{2325} \cdot |V_{2325}| \cdot \frac{dV_{2325}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - \frac{dH_{W1}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{2527} \cdot |V_{2527}| \cdot \frac{dV_{2527}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + \\
& + \frac{dH_{W2}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{2627} \cdot |V_{2627}| \cdot \frac{dV_{2627}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{2426} \cdot |V_{2426}| \cdot \frac{dV_{2426}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - 2 \cdot R_{2224} \cdot |V_{2224}| \cdot \frac{dV_{2224}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0 \\
\text{u)} & 2 \cdot R_{12} \cdot |V_{12}| \cdot \frac{dV_{12}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{24} \cdot |V_{24}| \cdot \frac{dV_{24}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + (V_{414})^2 \cdot \frac{dR_{tr414}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{414} \cdot |V_{414}| \cdot \frac{dV_{414}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{1424} \cdot |V_{1424}| \cdot \frac{dV_{1424}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} \\
& + 2 \cdot R_{2426} \cdot |V_{2426}| \cdot \frac{dV_{2426}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} - \frac{dH_{W2}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{2627} \cdot |V_{2627}| \cdot \frac{dV_{2627}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} + 2 \cdot R_{271} \cdot |V_{271}| \cdot \frac{dV_{271}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0
\end{aligned}$$

Równania (a – n) odpowiadają prawu równowagi dla węzłów, natomiast równania (o – u) prawu równowagi dla cykli. Dodatkowe warunki wynikające z ograniczeń dotyczących rozplywu wymuszonego (wzory 5.7.14a i b) można zapisać następująco:

$$\text{I)} \frac{dV_{1123}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0$$

$$\text{II)} \frac{dV_{1221}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0$$

$$\text{III)} \frac{dV_{1324}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0$$

$$\text{IV)} \frac{dV_{1424}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0$$

$$\text{V)} \frac{dR_{tr311}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 0$$

Strefę powietrza świeżego tworzy 8 bocznicy, dla których niewiadome są wartości $\frac{dV_i}{dV_{W1 \rightarrow W2}}$. Dla tej strefy zachodzi 8 równań (a – g oraz o) liniowych. Po uwzględnieniu założeń (I – IV) uzyskuje się jedyne możliwe rozwiązanie, w którym wartości wrażliwości wydatków powietrza w strefie powietrza świeżego są równe zero. Wskazuje to na brak oddziaływania zmiany wydatku powietrza na wentylatorze głównym (a w ogólnym przypadku bocznicy należącej do strefy zużytej) na wydatki powietrza w bocznicach z powietrzem świeżym. Właściwość ta jest niezależna od aktualnego rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej, warunkiem koniecznym jest natomiast założenie stałego wydatku powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego. Dotyczy więc to wyłącznie problematyki rozplywu wymuszonego.

Strefę powietrza zużytego (wraz z bocznica zamykającą) tworzy 9 bocznicy. Równania (h – n oraz p – u) odpowiednio odpowiadają pierwszemu i drugiemu prawu równowagi. Liczba równań wynosi 13, natomiast liczba niewiadomych występujących w równaniach wynosi 15 (w tym 9 niewiadomych typu $\frac{dV_i}{dV_{W1 \rightarrow W2}}$, 4 niewiadome typu $\frac{dR_{tr}}{dV_r}$ oraz 2 niewiadome typu $\frac{dH_i}{dV_r}$). Niektóre niewiadome występujące w równaniach można traktować jako znane, po dokonaniu obliczeń dla strefy świeżej. Po uwzględnieniu warunku ograniczającego (V) oraz zależności (5.7.15), liczba równań jest równa liczbie niewiadomych. Rozwiązując układ równań węzłowych (h – n), równania cyklowego (q) oraz warunków ograniczających (I – IV) wyznacza się wartości wrażliwości wydatków powietrza w bocznicach należących do strefy zużytej. W tablicy 5.7.2 zostały zebrane wartości wrażliwości wydatków powietrza w poszczególnych bocznicach.

Tab. 5.7.2

Wrażliwości wydatków powietrza w bocznicach na zmianę wydatku powietrza w bocznicy 25 27 dla sieci wentylacyjnej z rys.5.7.1

Strefa świeża												
Bocznica	1 2	2 3	2 4	4 3	3 11	11 23	3 12	12 21	4 13	13 24	4 14	14 24
Wrażliwość	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strefa zużyta												
Bocznica	21 22	21 23	22 23	22 24	23 25	24 26	25 27	26 27	27 1			
Wrażliwość	0,266	-0,266	-0,733	1	-1	1	-1	1	0			

Znając wrażliwości wydatków powietrza można wyznaczyć wykorzystując równania dla cykli oraz zależność (V) wrażliwości nastaw regulatorów na zmianę wydatku powietrza z wentylatora W_1 na wentylator W_2 . Dla poszczególnych elementów kształtują się one następująco:

$$\begin{aligned}\frac{dR_{tr3\ 11}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= 0 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^7 \cdot \text{m}^3} \right], & \frac{dR_{tr3\ 12}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= 0,0016 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^7 \cdot \text{m}^3} \right], \\ \frac{dR_{tr4\ 13}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= 0,0040 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^7 \cdot \text{m}^3} \right], & \frac{dR_{tr4\ 14}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= 0,0058 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^7 \cdot \text{m}^3} \right] \\ \frac{dH_{W1}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= -7,50 \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right], & \frac{dH_{W2}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= 11,63 \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]\end{aligned}$$

Znając wrażliwości regulatorów, można na podstawie wzoru (5.7.16) obliczyć wrażliwość mocy wentylatorów na wymienioną zmianę wydatków powietrza (przy wykorzystaniu wyników otrzymanych z obliczeń rozpyływu wymuszonego – tab. 5.7.1).

$$\begin{aligned}\frac{dN_u}{dV_{W1 \rightarrow W2}} &= \frac{dH_{w1}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} \cdot V_{w1} + \frac{dV_{w1}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} \cdot H_{w1} + \frac{dH_{w2}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} \cdot V_{w2} + \frac{dV_{w2}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} \cdot H_{w2} = \\ &= -7,50 \cdot 41,6667 + (-1) \cdot 1803,752 + 11,63 \cdot 41,6667 + 1 \cdot 1858,444 = 226,772 \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]\end{aligned}$$

Wyznaczona dodatnia wartość powyższej wrażliwości oznacza, że „skierowanie” większej ilości powietrza względem stanu bieżącego na wentylator W_2 kosztem wentylatora W_1 , nie jest korzystne ze względu na sumaryczną moc użyteczną wentylatorów. Przy zwiększeniu wydatku powietrza na wentylatorze W_2 oraz przy jednoczesnym zachowaniu wydatków powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego nastąpi wzrost sumarycznej mocy obydwu wentylatorów.

W celu sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników wykonano dodatkowe obliczenia sieciowe, wykorzystujące metodę przyrostową z dwóch różnych rozpyływów powietrza (przy stałych wydatkach powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego) w rozpatrywanej sieci. W pierwszym przypadku założono dodatkowy warunek wydatku powietrza przepływającego przez wentylator W_1 , który wynosił $2495 \text{ m}^3/\text{min}$, natomiast w drugim przypadku wydatek powietrza w tej samej bocznicie wynosił $2505 \text{ m}^3/\text{min}$. Odpowiednie rozpyływy powietrza wraz z wyróżnionymi kolorami nastawami regulatorów obrazują tablice 5.7.3 (wariant pierwszy) oraz 5.7.4 (wariant drugi). Uzyskane wyniki obliczeń dla tych dwóch wariantów potwierdzają otrzymane z metody wrażliwościowej informacje. Przeniesienie wydatku powietrza z wentylatora W_1 na

wentylator W₂ spowodowała wzrost sumarycznej mocy użytecznej tych wentylatorów (tablica 5.7.3.). Odwrotny kierunek przeniesienia pewnej ilości powietrza (5 m³/min) zmniejszył tą moc (tablica 5.7.4.) względem stanu aktualnego (tablica 5.7.1.).

Najważniejsze wyniki przeprowadzonej analizy dla trzech różnych rozpływów powietrza w strefie zużytej, spełniające zadane warunki wydatków powietrza dla bocznic należących do przekroju całkowitego zebrano w tablicy 5.7.5.

Tab. 5.7.3.

Wyniki obliczeń rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej
wariant 1 dla obliczeń metodą przyrostową

ms-350 siec przekatna 2 wentylatory 4 odbiory do sprawdzenia kryterium wzraliws
bocznic : 21 wezlow : 15 maks. wartosc wezla : 27 wentylatorow : 0
plik wej.:ms-350 dnia: 2007.03.31. godzina: 16:44

Numer bocznicy	Wezly bocznicy	Opor (mBd)	Wydatek powietrza (m3/min) (m3/s)		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
1	3 11	0.000	2000.00	33.3333	0.000	0.000
2	11 23	80.000	2000.00	33.3333	88.889	0.000
3	3 12	322.460	800.00	13.3333	57.326	0.000
4	12 21	160.000	800.00	13.3333	28.444	0.000
5	4 13	165.260	1200.01	20.0001	66.105	0.000
6	13 24	70.000	1200.01	20.0001	28.000	0.000
7	4 14	243.780	1000.00	16.6666	67.716	0.000
8	1 2	200.000	5000.00	83.3333	1388.889	0.000
9	2 3	120.000	2256.49	37.6082	169.725	0.000
10	2 4	80.000	2743.51	45.7252	167.263	0.000
11	4 3	30.000	543.51	9.0584	2.462	0.000
12	14 24	95.000	1000.00	16.6666	26.389	0.000
13	21 22	50.000	425.42	7.0904	2.514	0.000
14	21 23	80.000	374.58	6.2430	3.118	0.000
15	22 23	150.000	120.43	2.0071	0.604	0.000
16	22 24	130.000	305.00	5.0833	3.359	0.000
17	23 25	90.000	2495.00	41.5833	155.626	0.000
18	24 26	120.000	2505.00	41.7500	209.168	0.000
19	25 27	0.000	2495.00	41.5833	0.000	1803.128
20	26 27	0.000	2505.00	41.7500	0.000	1859.425
21	27 1	0.000	5000.00	83.3333	0.000	0.000

Nu = 152610,465 W

Z E S T A W I E N I E P O T E C J A Ł O W
K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J

1	2	3	4	11	12	13	14	21	22
0	-1389	-1559	-1556	-1559	-1616	-1622	-1624	-1644	-1647
23	24	25	26	27					
-1648	-1650	-1803	-1859	0					

Tab. 5.7.4.

Wyniki obliczeń rozpięty powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej
wariant 2 dla obliczeń metoda przyrostowa

ms-350 sieć przekątna 2 wentylatory 4 odbiory do sprawdzenia kryterium wrażliwości
bocznicy : 21 węzłów : 15 maks. wartość węzła : 27 wentylatorów : 0

Numer bocznicy	Węzły bocznicy		Opor (mBd)	Wydatek powietrza (m ³ /min) (m ³ /s)		Dys. (Pa)	Depr. (Pa)
1	3	11	0.000	2000.00	33.3333	0.000	0.000
2	11	23	80.000	2000.00	33.3333	88.889	0.000
3	3	12	322.210	800.00	13.3333	57.282	0.000
4	12	21	160.000	800.00	13.3333	28.445	0.000
5	4	13	164.530	1200.01	20.0001	65.813	0.000
6	13	24	70.000	1200.01	20.0001	28.000	0.000
7	4	14	242.730	999.99	16.6666	67.424	0.000
8	1	2	200.000	5000.00	83.3333	1388.889	0.000
9	2	3	120.000	2256.49	37.6082	169.725	0.000
10	2	4	80.000	2743.51	45.7252	167.263	0.000
11	4	3	30.000	543.51	9.0585	2.462	0.000
12	14	24	95.000	999.99	16.6666	26.389	0.000
13	21	22	50.000	422.76	7.0460	2.482	0.000
14	21	23	80.000	377.24	6.2873	3.162	0.000
15	22	23	150.000	127.76	2.1293	0.680	0.000
16	22	24	130.000	295.00	4.9167	3.143	0.000
17	23	25	90.000	2505.00	41.7500	156.875	0.000
18	24	26	120.000	2495.00	41.5834	207.501	0.000
19	25	27	0.000	2505.00	41.7500	0.000	1804.378
20	26	27	0.000	2495.00	41.5834	0.000	1857.466
21	27	1	0.000	5000.00	83.3333	0.000	0.000

Nu= 152572,533 W

Z E S T A W I E N I E P O T E C J A Ł O W
K O P A L N I A N E J S I E C I W E N T Y L A C Y J N E J

1	2	3	4	11	12	13	14	21	22
0	-1389	-1559	-1556	-1559	-1616	-1622	-1624	-1644	-1647
23	24	25	26	27					
-1648	-1650	-1804	-1857	0					

Tab. 5.7.5

Wybrane wartości parametrów rozpięty powietrza dla 3 wariantów
dla sieci wentylacyjnej z rys. 5.7.1

Wariant rozpięty	Wydatek powietrza na wentylatorze W ₁ [m ³ /min]	Wydatek powietrza na wentylatorze W ₂ [m ³ /min]	Potrzebne spiętnienie wentylatora W ₁ [Pa]	Potrzebne spiętnienie wentylatora W ₂ [Pa]	Sumaryczna moc wentylatorów W ₁ oraz W ₂ [W]
I	2495	2505	1803,128	1859,425	152610,465
II	2500	2500	1803,752	1858,444	152588,256
III	2505	2495	1804,378	1857,466	152572,533

Rozpływ II (pogrubiony w tablicy 5.7.5.) jest rozplywem aktualnym, natomiast dzięki rozpływom I oraz III można uzyskać za pomocą metody przyrostowej wielkość wpływu zmiany wydatku powietrza na wentylatorach głównych na parametry pracy wentylatorów.

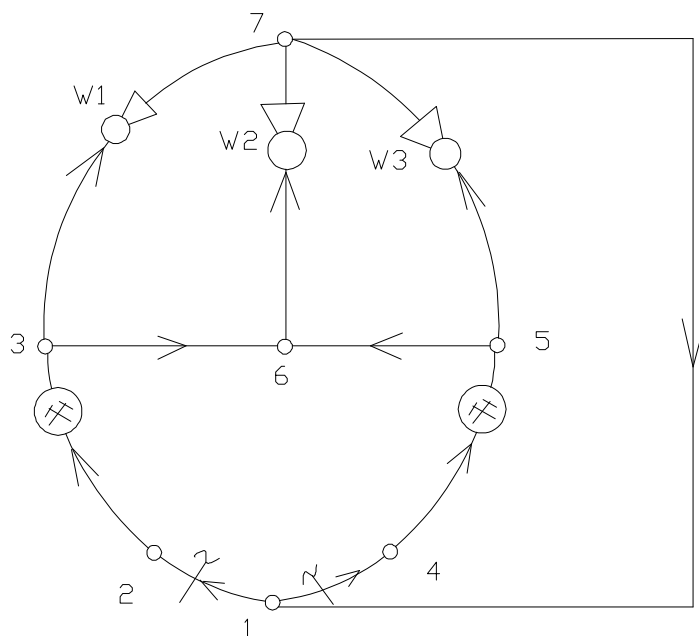
$$\frac{\Delta H_{w1}}{\Delta V_{w1 \rightarrow w2}} = \frac{1803,128 - 1804,378}{10/60} = -7,50 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{\Delta H_{w2}}{\Delta V_{w1 \rightarrow w2}} = \frac{1859,425 - 1857,466}{10/60} = 11,754 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{\Delta N_u}{\Delta V_{w1 \rightarrow w2}} = \frac{152610,465 - 152572,533}{10/60} = 227,592 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

Różnice uzyskane pomiędzy obiema metodami (metodą wrażliwościową oraz metodą obliczeń sieciowych) są małe (wynoszą do 1%), spowodowane są różnymi przyjętymi modelami sieci wentylacyjnej tj. odpowiednio modelem liniowym oraz modelem kwadratowym. Jeżeli rozpływy I oraz III „zbliżałyby” się do rozpływu II, różnice powinny maleć, aż do uzyskania pełnej zbieżności obliczeń.

Dalej zostanie pokazany przykład dla elementarnej sieci wentylacyjnej z trzema wentylatorami głównymi, których podsieci są połączone w strefie zużytej prądami „międzysystemowymi”. Schemat kanoniczny sieci został przedstawiony na rysunku 5.7.2.



Rys. 5.7.2 Schemat sieci kanonicznej z trzema wentylatorami głównymi do obliczania wrażliwości sumarycznej mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza

Bocznice 3-6 oraz 5-6 łączą podsieci wentylatorów głównych, dzięki czemu możliwe jest „skierowanie” określonej ilości powietrza na każdy z trzech wentylatorów głównych. Istnieją więc różne rozpływy powietrza w strefie zużytej, spełniające warunki ograniczające, które dotyczą ilości powietrza w bocznicach 2-3 oraz 4-5. Najważniejsze informacje o sieci wentylacyjnej zostały zawarte w tablicy 5.7.6.

Tab. 5.7.6
Zestawienie oporów bocznic oraz zadanych wydatków
dla sieci wentylacyjnej z rysunku 5.7.2

Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznic [g/m ⁷]	Zadany wydatek [m ³ /min]
1	2	?	-
2	3	100	3000
1	4	?	-
4	5	50	3000
3	6	80	-
5	6	100	-
3	7	50	-
6	7	30	-
5	7	70	-
7	1	0	-

Jedno z możliwych rozwiązań spełniające ograniczenie zostało przedstawione w tablicy 5.7.7. Rozwiązanie to bazowało na sumarycznym spadku naporu dla bocznic należących do drogi krytycznej.

Tab. 5.7.7
Zestawienie wyników rozplywu wymuszonego
dla sieci wentylacyjnej z rysunku 5.7.2

Węzeł początkowy	Węzeł końcowy	Opór bocznic [g/m ⁷]	Wydatek powietrza [m ³ /min]	Spadek naporu [Pa]	Potrzebne spiętrzenie wentylatora [Pa]
1	2	0	3000	0	-
2	3	100	3000	250	-
1	4	44,87	3000	112,17	-
4	5	50	3000	125	-
3	6	80	973,46	21,06	-
5	6	100	1104,46	33,88	-
3	7	50	2026,54	57,04	307,04
6	7	30	2077,92	35,98	307,04
5	7	70	1895,54	69,86	307,04
7	1	0	6000	0	-

Obliczona została również moc wentylatorów głównych, która wynosiła dla powyższego rozplywu 30704 W.

Uzyskany rozplyw powietrza nie musi być i prawdopodobnie nie jest optymalny ze wzgledu na zużycie mocy wentylatorów, dlatego w dalszej części zostaną obliczone wrażliwości mocy wentylatorów na zmiany wydatków powietrza przez nie przepływających. Dzięki wzajemnym połączeniom prądami „międzysystemowymi” wszystkich trzech podsieci wentylatorów głównych, należy rozważyć trzy różne przypadki przesunięcia elementarnej ilości powietrza pomiędzy wentylatorami. Na podstawie równań (5.7.11 – 5.7.13) oraz warunków (5.7.14) powstaje układ równań, w którym liczba niewiadomych przewyższa liczbę równań. Dlatego, w każdym z trzech przypadków konieczne jest rozszerzenie zależności (5.7.15) o dodatkowe założenia.

1. Elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym W_1 w całości przenosi się na wentylator drugi W_2 , co w sposób formalny można zapisać:

$$\frac{dV_{3\ 7}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = -1, \quad \frac{dV_{6\ 7}}{dV_{W1 \rightarrow W2}} = 1$$

2. Elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze pierwszym W_1 w całości przenosi się na wentylator trzeci W_3 , co w sposób formalny można zapisać:

$$\frac{dV_{3\ 7}}{dV_{W1 \rightarrow W3}} = -1, \quad \frac{dV_{5\ 7}}{dV_{W1 \rightarrow W3}} = 1$$

3. Elementarna zmiana wydatku powietrza na wentylatorze drugim W_2 w całości przenosi się na wentylator trzeci W_3 , co w sposób formalny można zapisać:

$$\frac{dV_{6\ 7}}{dV_{W2 \rightarrow W3}} = -1, \quad \frac{dV_{5\ 7}}{dV_{W2 \rightarrow W3}} = 1$$

W tablicy 5.7.8a i b przedstawiono wartości wrażliwości mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza dla wyżej wymienionych przypadków.

Tab. 5.7.8a.

Wrażliwości sumarycznej mocy wentylatorów
na zmianę wydatku powietrza dla sieci z rysunku 5.7.2

Kierunek elementarnej zmiany (przesuwów) wydatku powietrza pomiędzy wentylatorami	$W_1 \rightarrow W_2$	$W_1 \rightarrow W_3$	$W_2 \rightarrow W_3$
Wrażliwość mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza $\left[\frac{W \cdot s}{m^3} \right]$	129,79	313,87	184,07

Z uzyskanych rozwiązań (tablica 5.7.8a) wynika, że żaden z kierunków nie jest korzystny ze względu na postawioną problematykę. Wartości wrażliwości sumarycznej mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza są dodatnie, czyli całkowita moc wentylatorów wzrasta przy takich kierunkach „przesuwu” wydatku powietrza. Natomiast wszystkie odwrotne kierunki zmian wydatku powietrza są korzystne oraz posiadają wartości wrażliwości mocy wentylatorów przeciwstawne do wartości uzyskanych dla kierunków początkowych (wartości ujemne). Wyniki zebrano w tablicy 5.7.8b.

Tab. 5.7.8b.

Wrażliwości mocy wentylatorów na zmianę wydatku
powietrza dla sieci z rysunku 5.7.2 – przeciwne kierunki poprawy

Kierunek elementarnej zmiany (przesuwów) wydatku powietrza pomiędzy wentylatorami	$W_2 \rightarrow W_1$	$W_3 \rightarrow W_1$	$W_3 \rightarrow W_2$
Wrażliwość mocy wentylatorów na zmianę wydatku powietrza $[\frac{W \cdot s}{m^3}]$	-129,79	-313,87	-184,07

Analizując wyniki, można stwierdzić że najkorzystniej byłoby skierować większą ilość powietrza na wentylator W_1 , kosztem wydatku powietrza na wentylatorze W_3 (najmniejsza uzyskana wartość wrażliwości). Przy takim kierunku zmian, należy spodziewać się największego spadku mocy wentylatorów dla pewnej wielkości zmiany wydatku powietrza. W metodzie przyrostowej potwierdzono wyniki uzyskane metodą „wrażliwościową”. Końcowo należy zauważyć, iż uzyskane wyniki są prawidłowe dla konkretnego rozplywu powietrza i nie mogą być uogólniane na wszystkie rozplywy.

5.8. Metoda obliczeń rozplywu wymuszonego w sieciach wentylacyjnych z dowolną liczbą wentylatorów głównych wykorzystująca wrażliwość mocy wentylatorów głównych

Wcześniej omówione metody obliczeniowe umożliwiające poszukiwanie takiego rozplywu wymuszonego, dla którego moc wentylatorów głównych uzyskuje wartość minimalną, znajdują zastosowanie dla sieci wentylacyjnych w których maksymalnie znajdują się dwa wentylatory główne (poza sieciami omówionymi w rozdziale 5.6). W praktyce istnieją, szczególnie po procesie zespoleń, kopalnie wykorzystujące trzy i więcej szybów wydechowych, przy których montowane są wentylatory głównego przewietrzania. W przypadku gdy ich podsieci są połączone w strefie powietrza zużytego, stosowanie powyższych metod obliczeniowych nie daje rozwiązania. Koniecznym jest więc wykorzystanie innej metody, która zostanie omówiona w tej części pracy.

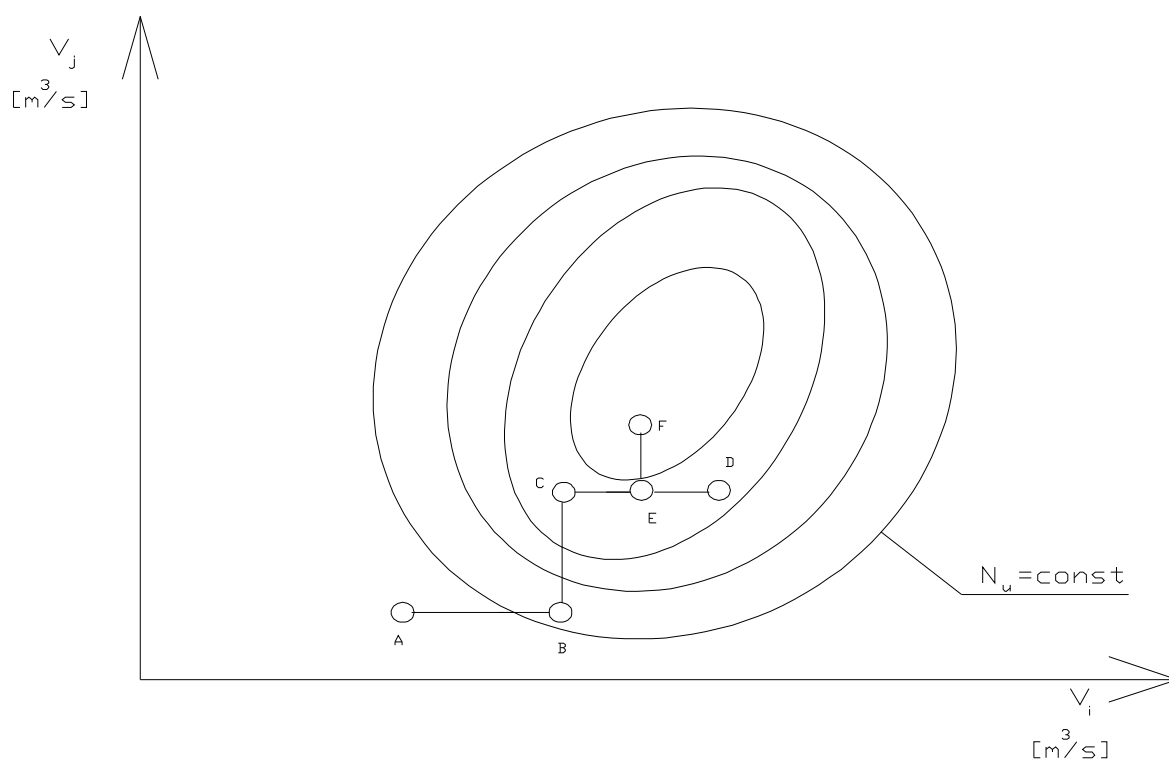
Rozpatrywane zagadnienie, jak wykazano w rozdziale 5.2, zaliczane może być do programowania wypukłego. Ze względu na nieliniowość równań ograniczających oraz funkcji celu zdecydowano się na wykorzystanie metody o charakterze iteracyjnym. Metody iteracyjne programowania wypukłego można podzielić na:

- metody bezgradientowe
- metody gradientowe

Metody bezgradientowe nie wymagają znajomości gradientu (czyli pierwszej pochodnej) funkcji, lecz korzystają tylko z informacji o jej wartości. Podstawowymi algorytmami poszukiwania optimum są: metoda złotego podziału, metoda interpolacji kwadratowej. Do bardziej złożonych można zaliczyć metody: Hooka – Jeevesa, Rosenbrocka, simpleksu Neldera, Gaussa – Seidela oraz inne [44, 66, 69].

Metody gradientowe, wymagają dodatkowo znajomości gradientu funkcji celu, w punkcie osiągniętym w poprzednim kroku. Najczęściej opierają się one na podążaniu w kierunku największego spadku. Do metod gradientowych (uszeregowanych w rosnącej trudności obliczeń) zaliczane są: metoda gradientu prostego, metoda najszybszego spadku, metoda gradientu sprzężonego. W wymienionych metodach uzyskuje się pewien ciąg punktów (odpowiadających rozwiązaniom dopuszczalnym) zbieżnych do punktu optymalnego. Osiągnięcie punktu optymalnego (odpowiadającemu optymalnemu rozplywowi powietrza w przedmiotowym zagadnieniu) zazwyczaj jest mało prawdopodobne w skończonej liczbie iteracji, dlatego obliczenia są kończone, gdy zostanie uzyskana żądana dokładność.

Dla postawionego problemu, zdecydowano się na wykorzystanie jednej z metod gradientowych, a mianowicie metodę gradientu prostego. Bazą kierunków ortogonalnych będą kierunki odpowiadające wydatkom powietrza na wentylatorach głównych. W tym miejscu należy dodać, że przy założonych wydatkach powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego i w bocznicach z wentylatorami głównymi, istnieje tylko jeden rozływ powietrza w całej sieci wentylacyjnej (przy położeniu regulatorów w bocznicach znajdujących się przed odbiorami powietrza). Wektor gradientu funkcji celu w bieżącym punkcie będzie uzyskiwany za pomocą wrażliwości mocy wentylatorów, o której była mowa w poprzednim podrozdziale. Na rysunku 5.8.1. przedstawiono graficzny przebieg algorytmu gradientu prostego.

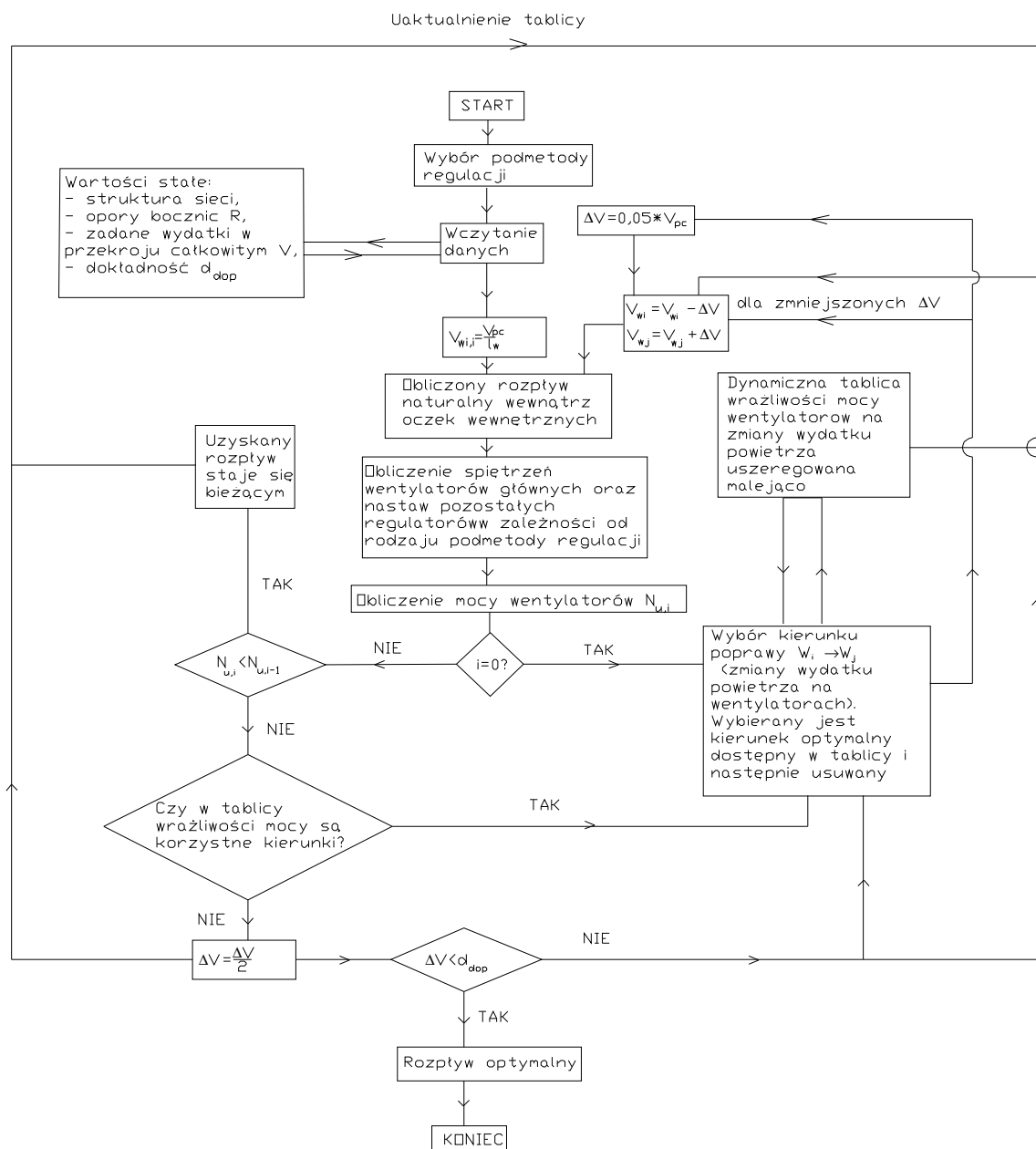


Rys. 5.8.1. Przebieg algorytmu metody gradientu prostego

Punkt A jest punktem startowym i odpowiada pewnemu rozplwowowi powietrza w sieci wentylacyjnej, dla którego obliczana jest wartość mocy wentylatorów oraz wyznaczany z metody „wrażliwościowej” kierunek poprawy (rozdział 5.7). Zgodnie z uzyskanym kierunkiem, w odległości wynikającej z algorytmu znajduje się punkt B (odpowiadający innemu, lecz spełniającemu wymagane warunki, rozplwowowi powietrza), dla którego obliczana jest moc wentylatorów. Jeżeli jest ona mniejsza, to punkt B staje się punktem bieżącym (rozplwem bieżącym). Dla punktu B zostaje wyznaczany kierunek poprawy (w przypadku pokazanym na rysunku jest on ortogonalny do kierunku poprzedniego), wzdłuż

którego w przyjętej odległości wyznaczany jest punkt C. Dalej obliczana jest moc wentylatorów dla punktu C i wyznaczany kolejny kierunek poprawy. Ponieważ w kolejnym punkcie D uzyskana moc była większa, niż w punkcie C odległość zostaje skrócona do połowy (punkt E). Punkt F staje się punktem końcowym, gdy zostaje uzyskana żądana dokładność.

Schemat blokowy wykorzystujący metodą gradientu prostego został przedstawiony na rysunku 5.8.2.



Rys. 5.8.2. Schemat blokowy algorytmu metody gradientu prostego

Po wyborze podmetody regulacji, należy przyjąć punkt startowy. Proponowanemu punktowi odpowiada równomierny rozpływ powietrza na każdy z wentylatorów głównych. Wydatek powietrza w bocznicach z wentylatorami głównymi można obliczyć ze wzoru:

$$V_{wi,0} = \frac{V_{pc}}{l_w} \quad [5.8.1]$$

Dla tak narzuconych dodatkowych warunków ograniczających wyznaczony zostaje rozpływ powietrza w strefie świeżej oraz zużytej, za pomocą jednej z metod przybliżonych [rozdział 2]. Dalej w zależności od wybranej podmetody regulacji oblicza się nastawy regulatorów oraz sumaryczną moc wentylatorów głównych. Dla tak wyznaczonego rozprywu powietrza (który staje się punktem bieżącym), możliwe jest stworzenie tablicy wrażliwości mocy sumarycznej wentylatorów na elementarną zmianę wydatku powietrza przenoszonego pomiędzy wentylatorami. Sposób postępowania przy wyznaczaniu tablicy wrażliwości został omówiony w poprzednim rozdziale. Tablica do dalszych obliczeń powinna zostać uporządkowana rosnąco. Gradient funkcji celu uzyskany z tablicy wrażliwości pozwala na określenie kierunku poprawy (jest to kierunek wynikający z pierwszego wiersza we wcześniej uporządkowanej tablicy), odpowiadającemu przeniesieniu pewnej ilości wydatku powietrza z wentylatora W_i na wentylator W_j . Po wyborze kierunku poprawy, zgodnego z gradientem jest on wykreślany z tablicy. Należy zauważyć, że dla sieci z dwoma wentylatorami głównymi istnieje tylko jeden możliwy kierunek poprawy (tablica wrażliwości będzie dwuelementowa, z jednym wyrazem o wartości ujemnej). Następnie obliczana jest odległość (odpowiadająca ilości powietrza, którą należy przenieść pomiędzy wentylatorami) pomiędzy punktami bieżącym i roboczym (tj. odpowiadającym im rozprywowi powietrza), zgodnie z następującym wzorem:

$$\Delta V = 0,05 \cdot V_{pc} \quad [5.8.2]$$

Znając kierunek poprawy oraz odległość pomiędzy punktami można obliczyć narzucane wydatki powietrza na wentylatorach głównych wykorzystując zależności:

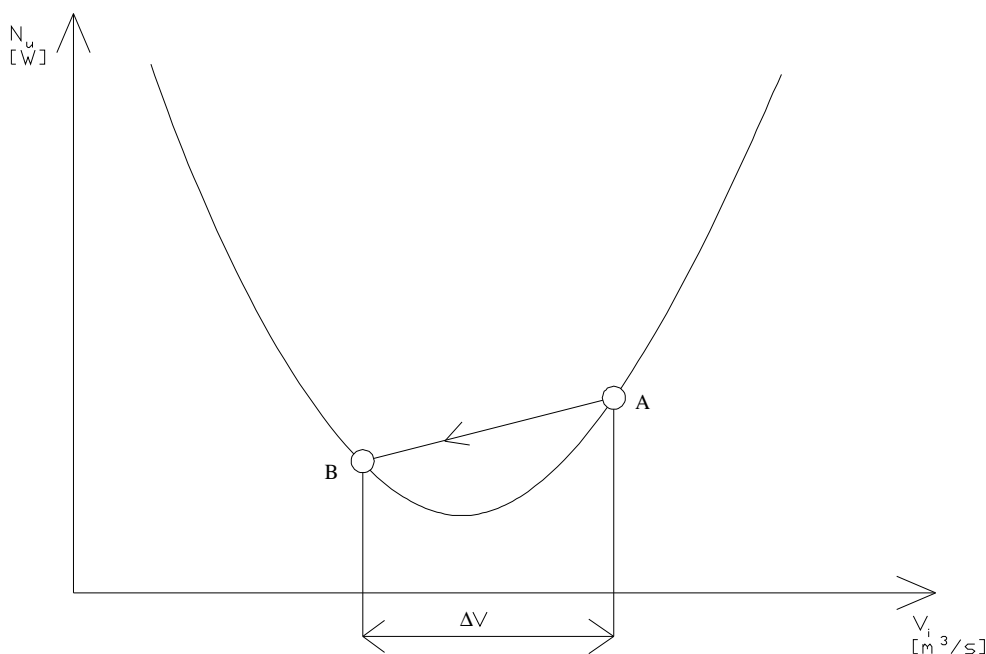
$$\begin{aligned} V_{wi} &= V_{wi} - \Delta V \\ V_{wj} &= V_{wj} + \Delta V \end{aligned} \quad [5.8.3]$$

Przy tak zadanych wydatkach powietrza w bocznicach z wentylatorami głównymi oraz przy stałych wydatkach w bocznicach należących do przekroju całkowitego przechodzącego przez odbiory powietrza, obliczany jest rozpływ powietrza w sieci wentylacyjnej, a w dalszej kolejności nastawy regulatorów oraz moc wentylatorów głównych.

Po obliczeniu sumarycznej mocy wentylatorów jest ona porównywana z mocą uzyskaną w poprzednim rozplywie powietrza. Mogą zajść dwa przypadki:

$$\begin{aligned} N_{u,i} &< N_{u,i-1} \quad (a) \\ N_{u,i} &\geq N_{u,i-1} \quad (b) \end{aligned} \quad [5.8.4]$$

Przypadek pierwszy jest korzystny w sensie minimalizacji mocy wentylatorów (uzyskany roboczy rozplyw powietrza jest bliższy rozplywowi optymalnemu, niż poprzedni rozplyw powietrza). Otrzymany tak rozplyw roboczy staje się rozplywem bieżącym. Przypadek ten obrazuje rysunek 5.8.3.



Rys. 5.8.3. Metoda gradientu prostego – krok korzystny

Znając bieżący rozplyw powietrza, aktualizowana jest tablica wrażliwości mocy wentylatorów na elementarną zmianę wydatku powietrza na wentylatorach. Po zaktualizowaniu tablicy wrażliwości, następuje zmiana zadanych wydatków powietrza na wentylatorach głównych (przy wykorzystaniu kierunku poprawy wynikłego ze zaktualizowanej tablicy wrażliwości), zgodnie ze wzorami 5.8.2 – 5.8.3. Dalej obliczane są rozplywy powietrza w strefach, nastawy regulatorów, sumaryczne moce wentylatorów oraz sprawdzany jest warunek określony zależnościami 5.8.4. Cykl ten jest powtarzany, aż do zaistnienia przypadku zgodnego do wzoru 5.8.4 b.

Możliwe jest, iż dla i-tego roboczego rozplywu powietrza moc wentylatorów jest większa, niż dla rozplywu poprzedniego (bieżącego w danym kroku). Zachodzi wtedy przypadek b określony we wzorze 5.8.4. W takiej sytuacji uzyskany i-ty rozplyw powietrza

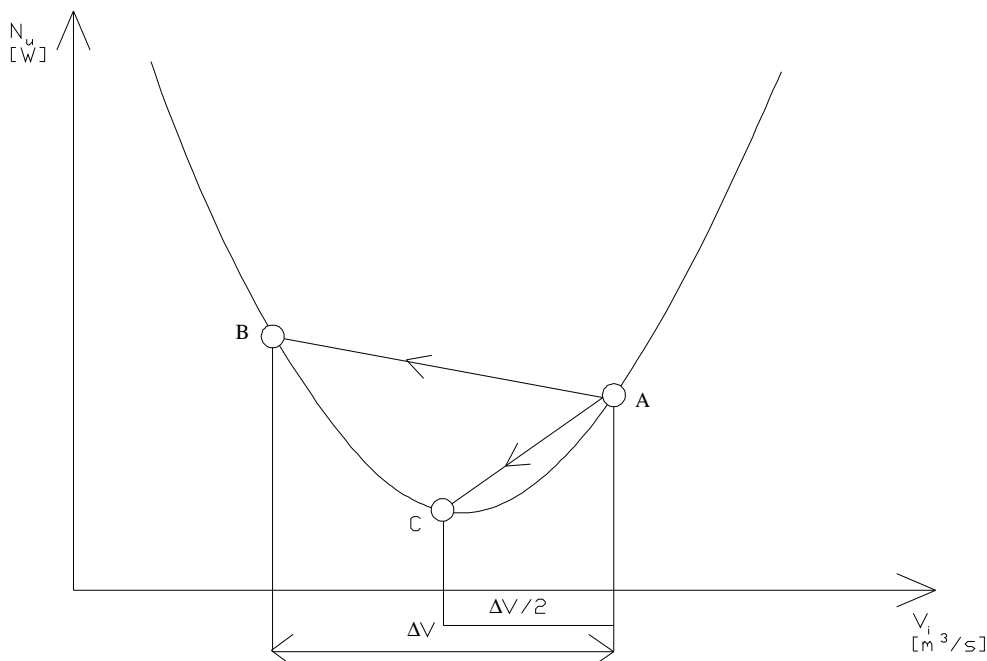
nie staje się rozplływem bieżącym. Jeżeli w tablicy wrażliwości mocy istnieją jeszcze wyrazy o wartościach ujemnych, wtedy kierunek poprawy (przeniesienia wydatku powietrza pomiędzy wentylatorami głównymi) zgodny jest z kierunkiem dla którego wyraz w tablicy osiąga wartość najmniejszą. Odległość (zmiana wydatku ΔV) między punktem bieżącym, a punktem roboczym leżącym na kierunku poprawy zgodna jest ze wzorem 5.8.2. Po wyznaczeniu położenia punktu roboczego (odpowiadającemu wyznaczonym warunkom ograniczającym), obliczany jest rozplływ powietrza, nastawy regulatorów oraz moc wentylatorów. Jeżeli moc wentylatorów przy roboczym rozplwywie powietrza jest mniejsza, niż moc wentylatorów uzyskana dla rozplwywu bieżącego, to punkt roboczy staje się punktem bieżącym. Dalszy ciąg postępowanie jest wtedy zgodny z przedstawionym wcześniej. Dla przypadku, gdy moc wentylatorów jest większa, dobierany jest kolejny kierunek poprawy, wyznaczony na podstawie tablicy wrażliwości (dla którego wrażliwość mocy wentylatorów posiada wartość ujemną).

Dla pewnego punktu bieżącego, możliwe jest, że w odległości ΔV od niego, funkcja celu uzyskuje we wszystkich bazowych kierunkach ortogonalnych poprawy wartości większe, niż w punkcie bieżącym (odpowiada to sprawdzeniu wszystkich kierunków, dla których wyrazy w tablicy wrażliwości uzyskują wartość ujemną). Konieczne wtedy staje się zacieśnienie obszaru poszukiwań minimum funkcji celu. Odległość ΔV , zmniejszana jest zgodnie ze wzorem:

$$\Delta V = \frac{\Delta V}{2} \quad [5.8.5]$$

Tablica wrażliwości jest odnawiana dla punktu bieżącego. W odległości nowego ΔV , sprawdzane są w kierunkach bazowych (kolejność poszukiwań zgodna z tablicą wrażliwości) wartości mocy wentylatorów. Przypadek ten jest pokazany na rysunku 5.8.4.

Punkt A odpowiada rozplływowi bieżącemu, dla którego obliczona została wartość mocy wentylatorów. W odległości ΔV znajduje się punkt (rozplływ) roboczy B, jednak moc wentylatorów dla rozplwywu powietrza zgodnego z położeniem punktu B jest większa niż dla rozplwywu odpowiadającemu punktowi A. Dlatego rozplływ B nie może stać się rozplwywem bieżącym. Zgodnie z zależnością 5.8.5 wyznaczono punkt (rozplływ) roboczy C, dla którego okazało się, że moc jest mniejsza niż dla rozplwywu A. Rozplływ C staje się rozplwywem bieżącym.



Rys. 5.8.4. Metoda gradientu prostego – krok niekorzystny, zmniejszenie odległości.

Dalsze postępowanie jest zgodne do przedstawionego wcześniej, uwzględnia się jednak zmniejszenie odległości pomiędzy kolejnymi punktami.

Obliczenia zostają zakończone w momencie, gdy odległość pomiędzy kolejnymi punktami jest mniejsza niż odległość dopuszczalna, założona na wstępie obliczeń.

$$\Delta V < \Delta V_{dop} \quad [5.8.6]$$

Przy spełnieniu powyższej zależności punkt bieżący staje się punktem zbliżonym do optymalnego, a rozpływ powietrza w sieci wentylacyjnej jest bliski najbardziej korzystnego w sensie używanej mocy wentylatorów.

6. Przykład optymalizacji mocy użytecznej wentylatorów głównych w obliczeniach rozplywu wymuszonego

6.1. Struktura wybranej sieci oraz przyjęte uproszczenia

Celem wykazania znaczenia, także praktycznego, poruszanej problematyki zostanie przedstawiony przykład obliczeniowy dla istniejącej kopalni. Rozpatrzony zostanie fragment sieci wentylacyjnej ZG „Lubin”, które są częścią KGHM Polska Miedź S.A. Obecnie w ZG „Lubin” istnieje 5 szybów wdechowych oraz 3 szyby wydechowe. W celach wentylacyjnych wykorzystywany jest także szyb wydechowy R VIII sąsiedniej kopalni „Rudna”. Z niektórych oddziałów wydobywczych w ZG „Lubin” zużyte powietrze płynie do dwóch lub nawet do trzech szybów wydechowych [150]. Świadczy to o występowaniu prądów zależnych w strefie zużytej łączących podsieci wentylatorów głównych. W szczególności pomiędzy podsieciami szybów wydechowych L IV i L V w zachodniej części kopalni występują liczne połączenia w strefie zużytej na przykład na podszybiach (rys. 1.7. przedstawiony w pierwszym rozdziale pracy).

Praktycznie obydwie szyby L IV i L V są bocznymi wylotowymi z podsieci wentylacyjnej zachodniej części kopalni. Zużyte powietrze z oddziałów eksploatacyjnych kierowane jest do L IV i L V i dalej odprowadzane jest na powierzchnię [150]. Wydatek całkowity powietrza zużytego dopływającego z tej części kopalni do szybów L IV i L V wynosi $V = 53034 \text{ m}^3/\text{min}$ [150]. Straty powietrza na zamknięciach zrębów szybów wynoszą łącznie $V = 6561 \text{ m}^3/\text{min}$.

Obecnie (III kw. 2007 r.) parametry pracy wentylatorów głównych zabudowanych przy szybach L IV i L V oraz główne wydatki powietrza w tej części kopalni są następujące [150]:

- szyb L IV:

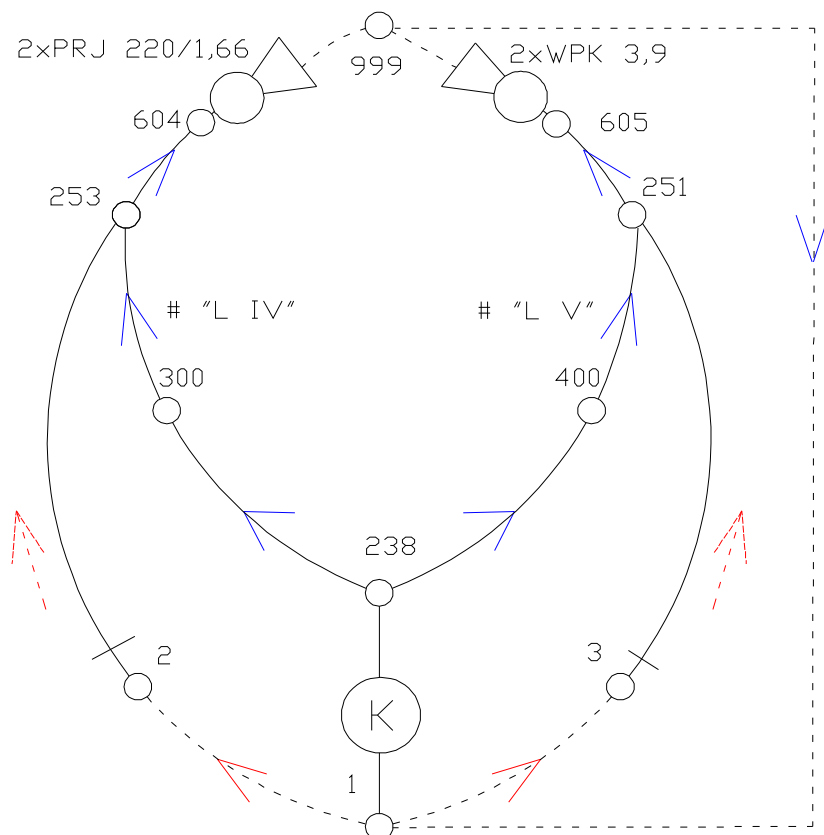
- stacja trójwentylatorowa PRJ 220/1,66; dwa wentylatory czynne jeden rezerwowy,
- wydajność wentylatorów czynnych: $V = 24000 \text{ m}^3/\text{min} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$,
- spiętrzenie: $\Delta P_c = 4074 \text{ Pa}$,
- moc użyteczna: $N_u = 1,629 \text{ MW}$,

- wydatek powietrza w szybie: $V = 21002 \text{ m}^3/\text{min} = 350 \text{ m}^3/\text{s}$,
- straty na zamknięciu zrębu: $V = 2998 \text{ m}^3/\text{min} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$
- szyb L V:
 - stacja trójwentylatorowa WPK 3,9; dwa wentylatory czynne jeden rezerwowy,
 - wydajność wentylatorów czynnych: $V = 35595 \text{ m}^3/\text{min} = 593,3 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - spiętrzenie: $\Delta P_c = 3583 \text{ Pa}$,
 - moc użyteczna: $N_u = 2,125 \text{ MW}$,
 - wydatek powietrza w szybie: $V = 32032 \text{ m}^3/\text{min} = 534 \text{ m}^3/\text{s}$,
 - straty na zamknięciu zrębu: $V = 3563 \text{ m}^3/\text{min} = 59,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Sumaryczna moc użyteczna wentylatorów obydwu stacji wynosi $N_{uc} = 3,754 \text{ MW}$. Jak widać wydajności, spiętrzenia i moce użyteczne wentylatorów nie są jednakowe. Wynika to z innych zastosowanych typów oraz z niejednakowych oporów szybów i kanałów wentylacyjnych.

W poprzednich rozdziałach pracy podano przykłady oraz wykazano, że w zagadnieniu obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza, w przypadku występowania prądów zależnych w strefie zużytej pomiędzy podsieciami wentylatorów głównych, występuje mniej lub bardziej wykształcone minimum sumarycznej mocy użytecznej tych wentylatorów. Na rysunku 1.7, będącym fragmentem schematu przestrzennego sieci wentylacyjnej ZG „Lubin”, pokazana jest duża liczba takich połączeń w strefie zużytej pomiędzy szybami L IV i L V. Nasuwa się pytanie dotyczące optymalnej, z uwagi na minimum sumy mocy użytecznej, pracy tych wentylatorów. Pytanie to dotyczy potrzebnych spiętrzeń, wydajności, ilości powietrza w poszczególnych szybach, tak by w kopalni zapewnić aktualny wydatek $V = 53034 \text{ m}^3/\text{min}$ oraz by, jak wspomniano, suma mocy użytecznej wentylatorów uzyskała minimum.

Rozwiązanie tego zagadnienia obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza dla całej sieci ZG „Lubin” w ramach tej pracy nie jest możliwe z uwagi na konieczność dysponowania pełnym jej modelem cyfrowym, a także modelami innych sąsiednich kopalń. Wiadomo, że w sieciach kopalń LGOM występuje duża liczba połączeń w strefie prądów świeżych i zużytych [150]. Przeprowadzone dalej obliczenia wykonano na modelu bardzo uproszczonym dotyczącym wyłącznie podszybia i szybów L IV i L V (rys. 1.7, 6.1).



Rys. 6.1. Ideowy schemat kanoniczny szybów zachodnich L IV i L V w ZG „Lubin”

W strukturze sieci wentylacyjnej kopalni przeprowadzono daleko idące uproszczenia prowadzące do sporządzenia ideowego schematu kanonicznego (rys. 6.1) i dalej modelu numerycznego dla takiego schematu (tab. 6.1). Potencjały powietrza na podszybiach w najważniejszych węzłach wlotowych 238 i 241 (rys. 1.7) do szybów są bardzo zbliżone i wynoszą odpowiednio: $\Phi_{238} = -2739$ Pa, $\Phi_{241} = -2580$ Pa [150]. W modelu uproszonym (rys. 6.1) węzły te zlepiono do jednego węzła 238 i przypisano mu potencjał średni $\Phi_{238sr} = -2660$ Pa. Kopalnię zastąpiono jedną boczniką 1 238 (wg numerów węzłów). W węźle 238 w modelu uproszczonym następuje rozdzielenie zużytego powietrza do szybów L IV i L V. W oparciu o potencjały węzłów 253 i 251, które stanowią skrzyżowania szybów wydechowych z kanałami wentylacyjnymi (rys. 1.7, 6.1): $\Phi_{253} = -3225$ Pa, $\Phi_{251} = -3103$ Pa, potencjały węzłów 604 i 605 przed wentylatorami: $\Phi_{604} = -4074$ Pa, $\Phi_{605} = -3582$ Pa oraz aktualne wydatki powietrza w odpowiednich bocznicach, wyznaczono zastępcze opory szybów, zamknięć zrębów i kanałów wentylacyjnych. Dane wejściowe i wyniki tych obliczeń oraz strukturę modelu uproszczonego zestawiono w tablicy 6.1. Do modelu struktury wprowadzono także pomocnicze półwęzły: 2, 3, 300, 400; są one przydatne w przeprowadzonych dalej obliczeniach optymalizacyjnych.

Tab. 6.1.

Dane wejściowe i wyniki obliczeń ideowego modelu numerycznego dla szybów L IV i L V w ZG „Lubin”

Lp.	Węzeł pocz.	Węzeł końc.	Potencjał w węźle pocz. [Pa]	Potencjał w węźle końc. [Pa]	Różnica poten- cjałów [Pa]	Wydatek powietrza [m ³ /min]	Wydatek powie- trza [m ³ /s]	Opór boczny [g/m ⁷]	Opis boczny
1	1	238	0	-2661	2661	53034	883,9	3,405	bocznicza zastępcza podsieci szybów L IV i L V
2	1	2	0	0	0	2998	50,0	0	zamknięcie szybu L IV
3	1	3	0	0	0	3563	59,4	0	zamknięcie szybu L V
4	2	253	0	-3224	3224	2998	50,0	1291,355	zamknięcie szybu L IV
5	3	251	0	-3103	3103	3563	59,4	879,949	zamknięcie szybu L V
6	300	253	-2661	-3224	563	21002	350,0	4,595	szyb L IV
7	238	300	-2661	-2661	0	21002	350,0	0	szyb L IV
8	400	251	-2661	-3103	442	32032	533,9	1,551	szyb L V
9	238	400	-2661	-2661	0	32032	533,9	0	szyb L V
10	253	604	-3224	-4074	850	24000	400,0	5,311	kanal wentylatora przy szy- bie L IV
11	251	605	-3103	-3582	479	35595	593,3	1,363	kanal wentylatora przy szy- bie L V
12	604	999	-4074	0	-4074	24000	400,0	0	wentylator przy szybie L IV
13	605	999	-3582	0	-3582	35595	593,3	0	wentylator przy szybie L V
14	999	1	0	0	0	59595	993,3	0	atmosfera

Bocznica 1 238 (rys. 6.1, tab. 6.1) jest zastępczą dla tej części kopalni. Bocznice 238 300 (pomocnicza o zerowym oporze) i 300 253 z wyznaczonym oporem zastępczym (tab. 6.1) w uproszeniu przedstawiają szyb L IV, bocznice 238 400 (pomocnicza o zerowym oporze) i 400 251 z wyznaczonym oporem zastępczym (tab. 6.1) przedstawiają szyb L V. Bocznice 1 2 (pomocnicza o zerowym oporze), 2 253, 1 3 (pomocnicza o zerowym oporze) oraz 3 251 odpowiadają zamknięciom zrębów szybów L IV i L V. Bocznice 253 604 i 251 605 odpowiadają kanałom wentylatorów. Bezoporowe bocznice 604 999 i 605 999 przeznaczone są dla wentylatorów, dla których dalej w modelu uproszczonym w obliczeniach optymalizacji mocy użytecznej poszukiwane będą potrzebne parametry pracy tych wentylatorów.

Opracowane wyniki uzyskane z aktualnego stanu przepływowego zostały sprawdzone obliczeniami rozpyłu powietrza dla tego stanu w sieci. Istotnych różnic nie stwierdzono.

6.2. Przebieg obliczeń optymalizacyjnych

W opracowanym modelu uproszczonym (rys. 6.1, tab. 6.1) występuje: 14 bocznic, 11 węzłów (łącznie z wprowadzonymi półwęzłami), liczba cyklomatyczna wynosi $v = 4$. Znałe są opory wszystkich bocznic, zadany będzie jeden wydatek całkowity powietrza w bocznicy 1 238, która reprezentuje przykładową część kopalni. Wydatek ten wynosi $V = 53034 \text{ m}^3/\text{min} = 883,9 \text{ m}^3/\text{s}$, w dalszych obliczeniach będzie zadany i stały. Poszukiwane będą wydajności i spiętrzenia wentylatorów głównych, takie by suma ich mocy użytecznej osiągnęła minimum. W zagadnieniu występują więc 13 niewiadomych wydatków powietrza (gdy uwzględni się równania dla 6 półwęzłów to tylko 7 niewiadomych wydatków) oraz dwa spiętrzenia wentylatorów głównych. Zagadnienie rozwiązane zostanie metodami przedstawionymi w poprzednich rozdziałach pracy.

W rozdziale 5 pracy stwierdzono, że w obliczeniach rozpyłu wymuszonego dla sieci z dwoma wentylatorami głównymi oraz z prądami zależnymi występującymi w strefie zużytej pomiędzy podsieciami tych wentylatorów, oprócz warunków wynikających z doboru ilości powietrza w bocznicach należących do przekroju całkowitego, potrzebne jest przyjęcie warunku doboru ilości powietrza na jednym z wentylatorów głównych. Podkreślono także, że takie przyjęcie dodatkowego dowolnego warunku nie prowadzi jeszcze do rozwiązania optymalnego z uwagi na minimum sumy mocy użytecznej. Potrzebne są dalsze obliczenia optymalizacyjne.

Dla fragmentu sieci wentylacyjnej ZG „Lubin” o strukturze przedstawionej na schemacie kanonicznym (rys. 6.1) i dla danych zestawionych w tablicy 6.1 łatwo zauważyć, że dalsze

założenie w obliczeniach jednego wydatku powietrza, na przykład w bocznicy 238 300 (w szybie L IV), pozwala na wyznaczenie wymaganego rozplywu powietrza w całej zamodelowanej sieci. Z równania dla węzła 238 bezpośrednio wyznacza się wydatek powietrza w bocznicy 238 400 (w drugim szybie - L V). Pozwala to dalej na wyznaczenie sum spadków naporu na dwóch drogach od węzła 1 do węzłów odpowiednio 253 i 251 (rys. 6.1). Możliwe jest więc wyznaczenie potrzebnych potencjałów powietrza w tych węzłach. Pozwala to dalej na obliczenie ucieczek powietrza w bocznicach 1 2 253 (rys. 6.1, wg numerów węzłów) i 1 3 251 reprezentujących zamknięcia zrębów szybów wydechowych (znane są opory tych bocznic, tab. 6.1). Tym samym wyznaczyć można wydatki powietrza w kanałach wentylacyjnych (bocznice 253 604 i 252 605) oraz wydajności wentylatorów. Potrzebne spiętrzenia dwóch wentylatorów wyznacza się z sumy spadków naporu na dwóch drogach od węzła początkowego sieci 1 do węzłów odpowiednio 604 i 605 przed wentylatorami głównymi (rys. 6.1). W ten sposób uzyskuje się wybrane rozwiązanie obliczeń rozplywu wymuszonego. Znając ten rozplyw można obliczyć potrzebne spiętrzenia wentylatorów przy szybach L IV i L V, ich moce użyteczne oraz sumę tych mocy.

Do wyznaczenia rozplywu powietrza, w którym moc użyteczna stacji wentylatorów głównych jest najmniejsza, zdecydowano się zastosować metodę przedstawioną w rozdziale 5.5 pracy. Przeprowadzono obliczenia dla sześciu różnych stanów, które uzyskiwano wyżej pokazanym sposobem przy założeniu stałego wydatku powietrza $V = 53034 \text{ m}^3/\text{min}$ w bocznicy 1 238 (bocznica zastępcza dla tej części kopalni) oraz wydatku powietrza o kolejno zadawanej wielkości w bocznicy 238 300 (w szybie L IV). Do tych rozwiązań należy także stan z rozplywem aktualnym (stan 3). Uzyskane w tych sześciu stanach potrzebne wydajności i spiętrzenia wentylatorów pozwoliły dalej na wyznaczanie ich mocy użytecznej oraz sumy tej mocy (tab. 6.2 ÷ 6.8). Wyznaczoną dla tych sześciu stanów obliczeniowych całkowitą moc użyteczną wentylatorów N_{uc} aproksymowano jako funkcję wydatku powietrza w bocznicy 238 300. Wyniki obliczeń zastawiono w kolejnych tablicach od 6.2 do 6.8 oraz pokazano na rysunku 6.2. Kolejność opisu założeń i wyników przeprowadzonych obliczeń w poszczególnych stanach obliczeniowych 1 ÷ 6 wynika z wymogów ich zestawienia pokazanego w tablicy 6.8.

Aktualny rozplyw powietrza (stan obliczeniowy 3), pokazany w tablicy 6.1, wraz z parametrami punktów pracy wentylatorów, pozwala na określenie ich całkowitej mocy użytecznej. Powietrze płynące z kopalni w ilości $V = 53034 \text{ m}^3/\text{min}$ rozdziela się w następujący sposób: do szybu L IV wydatek $V = 21002 \text{ m}^3/\text{min}$ (dodatkowo założony w obliczeniach rozplywu wymuszonego), do szybu L V wydatek $V = 32032 \text{ m}^3/\text{min}$ (wynika to z równania dla wę-

zła 238). Najważniejsze wyniki dotyczące tego stanu obliczeniowego przedstawione zostały w tablicach 6.2 i 6.8 – stan obliczeniowy 3.

Tab. 6.2.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego
dla sieci z rys. 6.1 – stan 3 (rozplyw aktualny)

Bocznica	Wydatek powietrza $V [m^3/min]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [Pa]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [kW]$	Suma mocy użytecznej wentylatorów $\Sigma N_u [kW]$
238 300 *	21002	-	-	-
238 400	32032	-	-	-
604 999	24000	4074	1629,7	3755,0
605 999	35595	3582	2125,3	
1 2	2998	-	-	-
1 3	3563	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

Przez wentylatory płynie w sumie $V = 59595 m^3/min$, z czego przez zamknięcia zębów szybów $V = 6561 m^3/min$. Suma mocy użytecznej w tym stanie obliczeniowym wynosi $\Sigma N_u = 3755,0 [kW]$.

Dalej rozważone zostaną dwa skrajne przypadki (stany obliczeniowe 1 i 6), w których założono, że całość powietrza z dołu kopalni płynie tylko do jednego z szybów. W pierwszym z nich (stan 1) założono graniczny przypadek, że całość powietrza z dołu kopalni płynie tylko do szybu L V. Powietrze płynące przez wentylator przy szybie L IV w tym stanie (granicznym) to tylko straty przez zamknięcie zębu tego szybu. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 6.3 i 6.8 – stan 1.

Tab. 6.3.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego
dla sieci z rys. 6.1 – stan obliczeniowy 1 (skrajny)

Bocznica	Wydatek powietrza $V [m^3/min]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [Pa]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [kW]$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u [kW]$
238 300 *	0	-	-	-
238 400	53034	-	-	-
604 999	2720	2671	121,1	4970,0
605 999	57016	5103	4848,9	
1 2	2723	-	-	-
1 3	3980	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

Wentylatory w tym stanie obliczeniowym powinny posiadać wydajność w sumie $V = 59735 \text{ m}^3/\text{min}$, z czego $6703 \text{ m}^3/\text{min}$ to straty na zamknięciach zrębów szybów. Suma mocy użytecznej stacji wentylatorów wynosi $\Sigma N_u = 4970,0 \text{ kW}$.

W drugim skrajnym przypadku (stan obliczeniowy 6 skrajny), założono że całość powietrza z dołu kopalni popłynie szybem L IV. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 6.4.

Tab. 6.4.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego dla sieci z rys. 6.1 – stan obliczeniowy 6 (skrajny)

Bocznica	Wydatek powietrza $V [\text{m}^3/\text{min}]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [\text{Pa}]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [\text{kW}]$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u [\text{kW}]$
238 300 *	53034	-	-	-
238 400	0	-	-	-
604 999	57209	11079	10563,1	10709,5
605 999	3298	2664	146,4	
1 2	4174	-	-	-
1 3	3299	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

Wentylatory obydwu stacji w tym stanie obliczeniowym powinni posiadać wydajność w sumie $V = 60506 \text{ m}^3/\text{min}$, z czego przez zamknięcia zrębów płynie $V = 7473 \text{ m}^3/\text{min}$. Potrzebna sumaryczna moc użyteczna wentylatorów wynosi $\Sigma N_u = 10709,5 \text{ kW}$.

Interesujące wydaje się rozpatrzenie przypadku, gdy powietrze z dołu kopalni z założenia rozdziela się równomiernie na obydwa szyby (stan obliczeniowy 4). Czy takie wymuszanie rozplywu jest najkorzystniejsze? Wyniki obliczeń zamieszczono w tablicy 6.5 oraz w tablicy 6.8 – stan obliczeniowy 4.

Tab. 6.5.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego dla sieci z rys. 6.1 – stan obliczeniowy 4

Bocznica	Wydatek powietrza $V [\text{m}^3/\text{min}]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [\text{Pa}]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [\text{kW}]$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u [\text{kW}]$
238 300 *	26517	-	-	-
238 400	26517	-	-	-
604 999	29666	4856	2400,1	4052,7
605 999	29997	3304	1651,8	
1 2	3149	-	-	-
1 3	3482	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

W tym stanie obliczeniowym wentylatory obydwu stacji powinny posiadać wydajność w sumie $V = 59664 \text{ m}^3/\text{min}$, starty na zamknięciach zrębów szybów wynoszą $V = 6631 \text{ m}^3/\text{min}$. Potrzebna sumaryczna moc użyteczna wentylatorów wynosi $\Sigma N_u = 4052,7 \text{ kW}$.

Dla zwiększenia dokładności dalej przeprowadzonych obliczeń aproksymacji rozpatrzone zostaną jeszcze dwa przypadki (stany obliczeniowe 2 i 5). W każdym z nich zostanie zadany wydatek powietrza w bocznicy 238 300 (szyb L IV), odpowiednio $40000 \text{ m}^3/\text{min}$ (stan 5) i $10000 \text{ m}^3/\text{min}$ (stan 2). Wyniki obliczeń zostały zamieszczone w tablicach 6.6, 6.7 i 6.8.

Tab. 6.6.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego
dla sieci z rys. 6.1 – stan obliczeniowy 5

Bocznica	Wydatek powietrza $V [\text{m}^3/\text{min}]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [\text{Pa}]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [\text{kW}]$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u [\text{kW}]$
238 300 *	40000	-	-	-
238 400	13034	-	-	-
604 999	43620	7509	5459,4	6233,2
605 999	16377	2835	773,8	
1 2	3621	-	-	-
1 3	3344	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

W tym stanie obliczeniowym stacje wentylatorów głównych powinny posiadać wydajność $V = 59997 \text{ m}^3/\text{min}$, ucieczki powietrza przez zamknięcia zrębów wynoszą $V = 6965 \text{ m}^3/\text{min}$. Potrzebna sumaryczna moc użyteczna wentylatorów wynosi $\Sigma N_u = 6233,2 \text{ kW}$.

Tab. 6.7.
Ważniejsze wyniki obliczeń rozplywu wymuszonego
dla sieci z rys. 6.1 – stan obliczeniowy 2

Bocznica	Wydatek powietrza $V [\text{m}^3/\text{min}]$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P [\text{Pa}]$	Moc użyteczna wentylatora $N_u [\text{kW}]$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u [\text{kW}]$
238 300 *	10000	-	-	-
238 400	43034	-	-	-
604 999	12787	3029	645,5	3989,1
605 999	46795	4287	3343,6	
1 2	2788	-	-	-
1 3	3761	-	-	-

* dodatkowo założony wydatek powietrza w szybie L IV

W tym stanie obliczeniowym stacje wentylatorów powinny posiadać wydajność w sumie $V = 59582 \text{ m}^3/\text{min}$, straty powietrza na zamknięciach zrębów szybów wydechowych wynoszą $V = 6549 \text{ m}^3/\text{min}$. Potrzebna sumaryczna moc użyteczna wentylatorów wynosi $\Sigma N_u = 3989,1 \text{ kW}$.

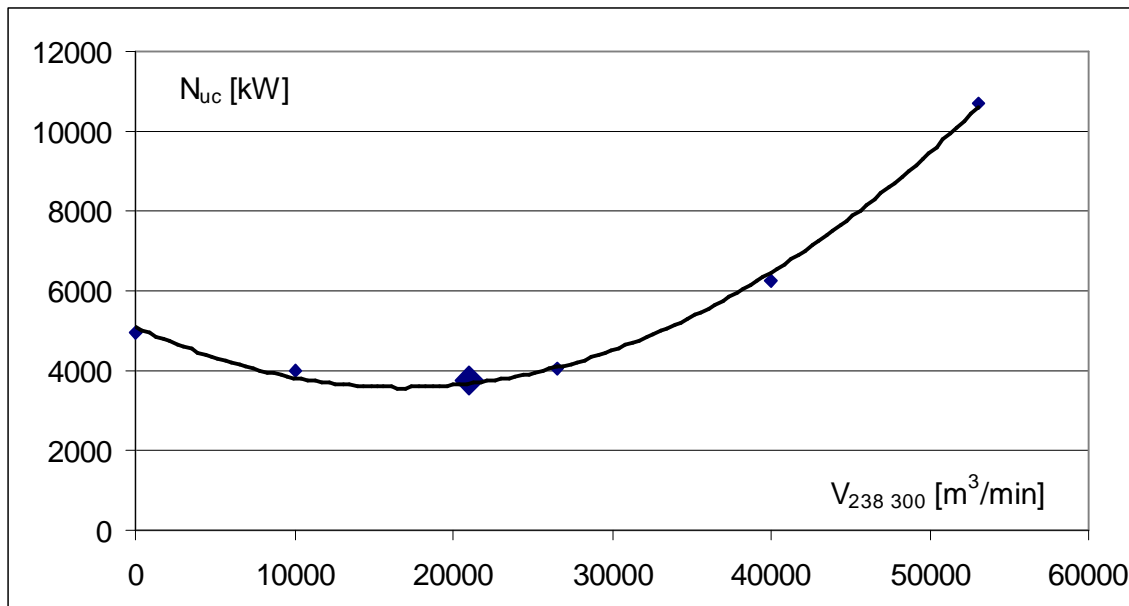
Znając wyniki obliczeń sześciu różnych stanów obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza dla analizowanego fragmentu sieci wentylacyjnej ZG „Lubin” wyznaczyć można zależność całkowitej mocy użytecznej wentylatorów ΣN_u od zakładanego rozplywu, w tym w szczególności od zakładanego wydatku powietrza w bocznicy 238 300. Dane do wyznaczenia tej zależności zestawiono w tablicy 6.8.

Tab. 6.8.

Zestawienie wyników obliczeń potrzebnej sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów w stanach obliczeniowych 1 ÷ 6

	Stan 1 (skrajny)	Stan 2	Stan 3 (aktualny)	Stan 4	Stan 5	Stan 6 (skrajny)
Wyciąg z wyników z tablicy	z tab. 6.3	z tab. 6.7	z tab. 6.2	z tab. 6.5	z tab. 6.6	z tab. 6.4
Założony wydatek powietrza w bocznicy 238 300 (#L IV) $V [\text{m}^3/\text{min}]$	0	10000	21002	26517	40000	53034
Wydatek powietrza w bocznicy 238 400 (#L V) $V [\text{m}^3/\text{min}]$	53034	43034	32032	26517	13034	0
Suma mocy użytecznej wentylatorów $N_{uc} = \Sigma N_u [\text{kW}]$	4970,0	3989,1	3755,0	4052,7	6233,2	10709,5

Na rysunku 6.2 w formie wykresu pokazano zależność $N_{uc} = f(V_{238\ 300})$, pośrednio także jako zależność $N_{uc} = f(V_{238\ 400})$ ponieważ zawsze w przeprowadzonych obliczeniach wydatek całkowity powietrza dopływające z tej części kopalni do szybów L IV i L V z założenia był stały i wynosił $V_{238\ 300} + V_{238\ 400} = 53934 \text{ m}^3/\text{min}$. Pogrubiony został punkt odpowiadający aktualnemu rozplywowi powietrza (stan obliczeniowy 3).



Rys. 6.2. Zależność sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów N_{uc} od założonej ilości powietrza w szybie L IV (w bocznicy 238 300)

Podobnie jak w przykładach pokazanych we wcześniejszych rozdziałach pracy zależność sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów głównych od założonego rozplywu powietrza $N_{uc} = f(V)$ posiada wyraźne minimum (rys. 6.2). W rozdziale 5.5 wykazano, że zależność ta może być aproksymowana wielomianem trzeciego stopnia oraz, że dla potrzeb praktycznych aproksymacja parabolą jest wystarczająco dokładna. Przeprowadzone obliczenia aproksymacji zależności $N_{uc} = f(V_{238\ 300})$ parabolą dla danych zestawionych w tabelicy 6.8 pozwoliły na uzyskanie następującej jej postaci:

$$N_u = 5,360 \cdot 10^{-6} \cdot (V_{238\ 300})^2 - 1,804 \cdot 10^{-1} \cdot (V_{238\ 300}) + 5091,925$$

Współczynnik korelacji osiągnął bardzo wysoką wartość $R^2 = 0,996877669$.

Przebieg zależności $N_{uc} = f(V)$ pokazany na rysunku 6.2 wskazuje, że wyznaczona parabola posiada minimum w pierwszej ćwiartce układu. Dla wyznaczenia tego minimum obliczono pierwszą pochodną i dalej wyznaczono miejsce zerowe tej pochodnej:

$$N_u' = 1,072 \cdot 10^{-5} \cdot (V_{238\ 300}) - 0,1804 = 0$$

Rozwiązując powyższe równanie uzyskuje się:

$$V_{238\ 300} = 16831\ m^3/min$$

Przy tej wartości wydatku powietrza w szybie L IV sumaryczna moc użyteczna wentylatorów głównych obydwu stacji uzyskuje minimum, które wynosi: $N_{uc} = 3722,5\ kW$.

Interesujące jest porównanie uzyskanych wyników z aktualnym stanem przepływowym powietrza w tej części sieci wentylacyjnej ZG „Lubin”. W tabelicy 6.9 zestawiono wyniki obliczeń parametrów wentylatorów głównych oraz ważniejszych wydatków powietrza wykona-

nych przy założeniu wydatku powietrza w szybie L IV równym $V_{238\ 400} = 16831\text{ m}^3/\text{min}$ (stan obliczeniowy 7 - optymalny).

Tab. 6.9.
Wyniki obliczeń sprawdzające rozpyływ wymuszony dla sieci z rys. 6.1 (stan obliczeniowy 7 - optymalny)

Bocznica	Wydatek powietrza $V\text{ [m}^3/\text{min]}$	Potrzebne spiętrzenie wentylatora $\Delta P\text{ [Pa]}$	Moc użyteczna wentylatora $N_u\text{ [kW]}$	Całkowita moc użyteczna wentylatorów $\Sigma N_u\text{ [kW]}$
238 300 *	16831	-	-	-
238 400	36 203	-	-	-
604 999	19733	3596	1182,7	3722,5
605 999	39834	3826	2539,8	
1 2	2854	-	-	-
1 3	3676	-	-	-

* założony wydatek powietrza w szybie L IV

Wentylatory główne stacji w sumie powinny posiadać wydajność $V = 59567\text{ m}^3/\text{min}$, straty zewnętrzne na zamknięciach zrębów szybów wynoszą $V = 6420\text{ m}^3/\text{min}$. Sumaryczna moc użyteczna wentylatorów głównych, zgodnie z wyżej przedstawionymi obliczeniami, przyjmuje wartość $N_{uc} = 3722,5\text{ kW}$.

Tab. 6.10.
Porównanie parametrów pracy stacji wentylatorów głównych w stanie aktualnym (3) i optymalnym (7)

Lp.				Bocznica $w_p\ w_k$	Stan obliczeniowy 3 (aktualny)	Stan obliczeniowy 7 (optymalny)	Uwagi
	1	2	3	4	5	6	7
1.	Wydatek powietrza w podsieci szyby zachodnie	V	$[\text{m}^3/\text{min}]$	1 238	53034	53034	
2.	Wydatek powietrza w szybie L IV	V	$[\text{m}^3/\text{min}]$	238 300	21002	16831	
3.	Wydatek powietrza w szybie L IV	V	$[\text{m}^3/\text{min}]$	238 400	32032	36302	
Stacja went. przy szybie L IV				604 999			
4.	Wydajność stacji	V	$[\text{m}^3/\text{min}]$	604 999	24000	19733	
5.	Spiętrzenie stacji	ΔP	$[\text{Pa}]$	604 999	4074	3596	
6.	Moc użyteczna	N_u	$[\text{kW}]$	604 999	1629,7	1182,7	
Stacja went. przy szybie L V							
7.	Wydajność stacji	V	$[\text{m}^3/\text{min}]$	605 999	35595	39834	
8.	Spiętrzenie stacji	ΔP	$[\text{Pa}]$	605 999	3582	3826	
9.	Moc użyteczna	N_u	$[\text{kW}]$	605 999	2125,3	2539,8	
10.	Suma mocy użytecznej	ΣN_u	$[\text{kW}]$	-	3755,0	3722,5	$\Delta N_u = 32,5$

6.3. Wnioski z rozdziału 6

Analiza optymalizacji mocy użytecznej stacji wentylatorów głównych zabudowanych przy szybach L IV i L V w ZG „Lubin”, przeprowadzona w niniejszym rozdziale pracy w oparciu o opracowany uproszczony model numeryczny tej części sieci, pozwala na sprecyzowanie następujących stwierdzeń i wniosków:

1. Uzyskana zależność sumarycznej mocy użytecznej stacji wentylatorów głównych zabudowanych przy szybach L IV i L V w ZG „Lubin” w zagadnieniu obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w sieciach, w których w strefie zużytej występują prądy zależne pomiędzy ich podsieciami, potwierdziła istnienie minimum tej mocy (tab. 6.8, rys. 6.2).
2. Aktualne parametry pracy stacji wentylatorów głównych zabudowanych w ZG „Lubin” przy szybach L IV i L V, oraz parametry wyznaczone z obliczeń optymalizacyjnych są prawie identyczne (tab. 6.10). Suma ich mocy użytecznej w stanie aktualnym (stan obliczeniowy 3) bardzo niewiele różni się od wyznaczonej mocy minimalnej – stan obliczeniowy 7 (tab. 6.10, rys. 6.2).
3. W ogólnym przypadku zapewnienie określonej ilości powietrza w wyrobiskach kopalnianych można uzyskać przy różnym jego rozdziale na poszczególne szyby wydechowe (tab. 6.8, rys. 6.2). Uzyskiwane w obliczeniach i w praktyce parametry punktów pracy wentylatorów głównych mogą się różnić od siebie w znacznym stopniu. Dotyczy to także ich sumarycznej mocy użytecznej, dla której należy wyznaczać minimum.
4. W przypadku wentylatorów istniejących, przy ocenie ekonomiki ich pracy, jak wiadomo, oprócz potrzebnej mocy użytecznej istotne są także ich sprawności.

7. Wnioski końcowe

1. Przekształcenia wynikłe podczas restrukturyzowania polskiego górnictwa węgla kamiennego doprowadziły nie tylko do koncentracji i intensyfikacji wydobycia surowca, ale również spowodowały liczne przypadki zespalandia kopalń.
2. Kopalnie węgla kamiennego i kopalnie miedzi, a w szczególności kopalnie zespolone, najczęściej odprowadzają zużyte powietrze na powierzchnie za pomocą kilku szybów wydechowych. Sprzyja to występowaniu zużytych prądów zależnych łączących podsieci wentylatorów głównych (tzw. prądów międzysystemowych) zainstalowanych przy tych szybach.
3. Prądy zależne, a w szczególności prądy wspomniane w drugim wniosku, mają zarówno znaczenie negatywne jak i pozytywne.
4. Ze względu na powszechne występowanie zagrożeń metanowego, pożarowego i ciepłego koniecznym staje się zapewnienie odpowiednich ilości powietrza w wyrobiskach górniczych, a w szczególności w miejscach odbioru świeżego powietrza (oddziały wydobywcze, przygotowawcze, komory funkcyjne).
5. W kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających wymienione we wniosku 2 prądy powietrza istnieje wiele rozwiązań dopuszczalnych (rozpływów powietrza) zapewniających dostarczenie założonej ilości powietrza do miejsc jego odbioru. Rozwiązania te różnią się od siebie niezbędnymi parametrami pracy wentylatorów głównego przewietrzania, w tym także różna może być potrzebna ich moc użyteczna.
6. Jednym z kryteriów optymalizacji rozplywu wymuszonego powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych może być minimalizacja sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów głównych.

7. Zastosowanie metody Sałustowicza (bazującej na drodze krytycznej) oraz jednej z metod pozwalających na wyznaczenie naturalnego rozpływu powietrza w oczkach wewnętrznych sieci, skutkuje wyznaczeniem optymalnego rozpływu wymuszonego tylko dla sieci z jednym wentylatorem głównym (poza szczególnymi sieciami, w których podsieci wentylatorów głównych nie są połączone w strefie powietrza zużytego).
8. W sieciach wentylacyjnych z dwoma wentylatorami głównymi połączonymi prądami międzysystemowymi można zastosować jedną z dwóch metod przedstawionych w pracy, w celu wyznaczenia wymuszonego rozpływu powietrza minimalizującego sumaryczną moc wentylatorów.
9. Wykorzystanie metody złotego podziału umożliwia znalezienie w skończonej liczbie iteracji rozpływu powietrza zbliżonego do rozpływu optymalnego. Druga metoda polega na wyznaczeniu zależności sumarycznej mocy użytecznej wentylatorów jako funkcji wydatku powietrza przepływającego przez jeden z wentylatorów głównych. Analiza rozpływów optymalnych otrzymanych z obydwu metod wykazała, że są one zbliżone do siebie.
10. W sieciach wentylacyjnych w których pracuje trzy lub więcej wentylatorów głównych, których podsieci są wzajemnie połączone w strefie powietrza zużytego, przesunięcie pewnej określonej ilości powietrza pomiędzy nimi może spowodować różne zmiany ich sumarycznej mocy użytecznej. Przydatna przy określeniu najkorzystniejszego przesunięcia, ze względu na zadane kryterium, może być wrażliwość tej mocy na elementarną zmianę wydatku powietrza w bocznicy z wentylatorem głównym.
11. Dla sieci wentylacyjnych z przynajmniej dwoma wentylatorami głównymi można zastosować algorytm wykorzystujący metodę gradientu prostego w celu wyznaczenia optymalnego rozpływu wymuszonego, który minimalizuje moc wentylatorów.

Powyższe wnioski wskazują, że teza pracy została udowodniona.

LITERATURA:

1. Albrand N., Froger C., Josien J-P.: Practical use of microcomputers for ventilation calculations. Mine Ventilation, Third International Congress, Harrogate, England, 1984
2. Badura H., Biernacki K., Sułkowski J., Żur K.: Czynniki decydujące o prędkości wycofywania się załogi zadymionymi wyrobiskami w czasie pożaru kopalni. Przegląd Górniczy, nr 6, 1996
3. Badura H., Pham Quang A.: Grafika komputerowa jako narzędzie wspomagania prac służb wentylacyjnych w kopalniach. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 246, Gliwice 2000
4. Badura H., Sułkowski J.: Droga uciezkowa jako element systemu zabezpieczenia przeciwpożarowego kopalni. Przegląd Górniczy, nr 7-8, 1996
5. Baltaretu F., Matei I.: Topological and potential stability of the ventilation systems specific for the jiu valley collieries.
6. Barczyk S.: Dyskusja o artykule „Parametryczny sposób regulacji sieci wentylacyjnej”. Przegląd Górniczy, nr 9, 1956
7. Białas S., Mikołajczyk W., Branny M.: Regulacja sieci wentylacyjnej za pomocą ETO. Przegląd Górniczy, nr 5, 1980
8. Biernacki K., Gumiński A.: Ocena dokładności wykonywania bazy danych kopalnianej sieci wentylacyjnej dla obliczeń komputerowych. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 27
9. Biernacki K., Kropsz K.: Zastosowanie wentylatorów swobodnych do regulacji przepływu powietrza w kopalniach węgla. Przegląd Górniczy, nr 10, 1981
10. Biernacki K., Kropsz K.: Opory aerodynamiczne zmechanizowanych wyrobisk ścianowych. Przegląd Górniczy, nr 1-7, 1982
11. Bradecki W.: Stan bezpieczeństwa w górnictwie polskim. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, art. 1, Zakopane 2004
12. Budryk W.: Pożary i wybuchy w kopalniach. Wydawnictwo Górniczo – Hutnicze, Katowice 1956
13. Budryk W.: Wentylacja kopalń. Przewietrzanie wyrobisk. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice, 1961
14. Bystroń H.: Parametryczny sposób regulacji wentylacyjnej. Przegląd Górniczy, nr 12, 1955
15. Bystroń H.: Wpływ elementów sieci i pożaru na kierunki prądów powietrznych w kopalni. Przegląd Górniczy, nr 7-8, 1957
16. Bystroń H.: Metoda regulacji skrępowanej rozplywu powietrza w kopalni. Przegląd Górniczy, nr 11, 1968
17. Bystroń H.: Rekurencyjna metoda modelowa wyznaczania rozplywu powietrza w pasywnych sieciach wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 9, 1970
18. Bystroń H.: Metody modelowe wyznaczania rozplywu powietrza w aktywnych sieciach wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 10, 1970
19. Bystroń H.: Zastosowanie schematu potencjalnego do analizy bezpieczeństwa sieci wentylacyjnej. Przegląd Górniczy, nr 3, 1971
20. Bystroń H.: Metoda projektowania rozplywów wymuszonych powietrza w aktywnych sieciach wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 6, 1971
21. Bystroń H.: Metoda regulacji systemu przewietrzania generującego depresje cieplną. Archiwum Górnictwa t. 26 z. 4, PAN Komitet Górnictwa, Warszawa – Kraków 1981
22. Bystroń H.: Podstawowe pojęcia i związki opisujące quasi – stacjonarny przepływ powietrza wilgotnego wyrobiskiem górniczym w kopalni podziemnej. Przegląd Górniczy, nr 11 – 12, 1982

23. Bystroń H.: Rola depresji w opisach przepływów powietrza w systemach przewietrzania kopalń. *Przegląd Górniczy*, nr 4, 1983
24. Bystroń H.: Stabilność pracy stacji wentylatorowej w sieci kopalnianej z przepływami masy powietrza suchego traktowanej jako układ z parametrami skupionymi. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1993 art. 3
25. Bystroń H.: Potencjał aerodynamiczny powietrza wentylacyjnego w kopalni o trudnych warunkach termicznych. *Przegląd Górniczy*, nr 10, 2000
26. Bystroń H.: Metody manometryczna i barometryczna pomiaru ciśnienia statycznego powietrza wentylacyjnego w wyrobiskach górniczych. *Przegląd Górniczy*, nr 12, 2000
27. Bystroń H.: Określenie wąskich dróg powietrza w systemach wentylacji kopalń. *Przegląd Górniczy*, nr 12, 2001
28. Bystroń H.: Obliczenia podsystemu wentylacji kopalni podczas normalnego ruchu górniczego oraz w czasie pożaru we wznoszącym się prądzie powietrza wentylacyjnego. *Przegląd Górniczy*, nr 9, 2002
29. Bystroń H.: Dodatkowe zabezpieczenia prądów schodzących powietrza świeżego oparte na zmodyfikowanym schemacie kanonicznym i na stopniu bezpieczeństwa. Konferencja „Głębokie Złoże” VI.2005. Jugowice
30. Bystroń H., Baranowski J., Madeja B., Strachacki A.: Metoda projektowania rozpyłów wymuszonych powietrza w pasywnych sieciach wentylacyjnych z prądami zależnymi. Komunikat GIG nr 634, Katowice, 1975.
31. Bystroń H., Jaroń S., Markefka P., Strumiński A.: Sposób przewietrzania wyrobisk górniczych udostępniających z jednego szybu. *Wiadomości Górnicze*, nr 7-8, 1973
32. Chojcan J.: Sposób obliczania wpływu zmian wartości elementów sieci wentylacyjnej na natężenie przepływu powietrza w bocznicach z wykorzystaniem tzw. sieci dołączonej. *Przegląd Górniczy*, nr 1, 1975
33. Ciepiela B., Firlejczyk C., Kajdasz Z.: Przykłady zastosowania schematów potencjalnych w wentylacyjnej profilaktyce pożarowej i metanowej. *Wiadomości Górnicze*, nr 1, 1993
34. Cygankiewicz J.: O stabilności przepływu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Materiały seminarium nt.: Aktualne problemy wentylacji, klimatyzacji i zwalczania pożarów w kopalniach podziemnych. Instytut Eksploatacji Złóż Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śl. w Gliwicach. Ustroń, listopad 1995
35. Czeczott H.: Metoda badań i wyniki prac nad teorią wentylacji. Wybór pism H. Czeczotta, opracowanie J. Litiwniszyn. PWN, Warszawa 1957
36. Czeczott H.: Przewietrzanie kopalni trzema szybami. Wybór pism H. Czeczotta, opracowanie Knothe S., Bodziony J. PWN, Warszawa 1957
37. Czeczott H.: Niebezpieczeństwo wentylatorów podziemnych. Wybór pism H. Czeczotta, opracowanie Walden H.. PWN, Warszawa 1957
38. Drenda J.: Wyznaczanie oporów aerodynamicznych tam wentylacyjnych dla projektowania lub rekonstrukcji systemu wentylacji kopalń. *Przegląd Górniczy*, nr 3, 1984
39. Drenda J., Gumiński A.: Określenie minimalnych prędkości przepływu powietrza w przodkach górniczych ze względu na klimatyczne warunki pracy. Materiały seminarium nt.: Aktualne problemy wentylacji, klimatyzacji i zwalczania pożarów w kopalniach podziemnych. Instytut Eksploatacji Złóż Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śl. w Gliwicach. Ustroń, listopad 1995
40. Drenda J., Niemiec G.: Regulacja przewietrzania kopalni węgla kamiennego w czasie jej budowy. *Przegląd Górniczy*, nr 7, 1991
41. Dziurzyński W., Kaletka H.: Zastosowanie metody symulacji pożaru podziemnego do analizy sieci wentylacyjnej kopalni „Rymer”. *Przegląd Górniczy*, nr 9, 1988

42. Dziurzyński W.: Symulacja numeryczna procesu przewietrzania – programy komputerowe. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 36
43. Edwards J., Jing-shu L.: Computer simulation of ventilation in multilevel mines. Mine Ventilation, Third International Congress, Harrogate, England, 1984
44. Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1977
45. Firganek B., Karolczak Z., Krzystanek Z., Marcinkowski K., Wasilewski S.: Sterowanie procesem wentylacyjnym kopalni węgla kamiennego. Przegląd Górniczy, nr 7-8, 1975
46. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. Wydawnictwo Naukowe – Techniczne. Warszawa, 1993
47. Frączek R.: Aerologia górnicza. Skrypty uczelniane nr 1001, Gliwice 1981
48. Frączek R.: Metoda empiryczna określenia aerodynamicznej charakterystyki kopalnianych tam wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 3, 1983
49. Frączek R.: Regulacja rozplywu powietrza w wyrobiskach udostępniających z zastosowaniem wentylatorów swobodnych. Wiadomości Górnicze, nr 8 – 9, 1983
50. Frączek R.: Uwagi dotyczące określenia oporu aerodynamicznego wyrobisk z uwzględnieniem wymiany ciepła. Przegląd Górniczy, nr 1, 1999
51. Frączek R., Kurzydym J.: Czynniki wentylacyjny w koncepcyjnym projektowaniu kopalni przy schodzeniu z eksploatacją na większą głębokość. Wiadomości Górnicze, nr 3, 1991
52. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1981
53. Frycz A.: Wpływ wzrostu prędkości powietrza w wyrobiskach górniczych na zagrożenia powodowane pożarami podziemnymi. Przegląd Górniczy, nr 10, 1986
54. Frycz A., Drenda J., Domagała L.: Aerodynamiczne charakterystyki kopalnianych tam wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 9, 1978
55. Frycz A., Drenda J., Kolarczyk M., Salomon A.: Efekty zastosowania elektronicznej techniki obliczeniowej w kierowaniu i projektowaniu wentylacji w kopalniach „LGOM” IV Krajowy Zjazd Górnictwa Rud, Olkusz, czerwiec 1976
56. Frycz A., Drenda J., Kolarczyk M.: Wentylatory pomocnicze w kopalniach węgla, rozszerzenie zastosowania. Mechanizacja i automatyzacja górnictwa, nr 11, 1997
57. Frycz A., Kolarczyk M.: Zastosowanie charakterystyki otoczenia podsieci wentylacyjnej do analizy przewietrzania oddziału. Bezpieczeństwo pracy w górnictwie, nr 1, 1979
58. Frycz A., Kozłowski B.: Przewietrzanie kopalń metanowych. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1980
59. Frycz A., Sułkowski J.: Kierowanie przewietrzaniem kopalni w oparciu o elektroniczną technikę obliczeniową. Przegląd Górniczy, nr 10, 1973
60. Frycz A., Sułkowski J.: Kryterium wyboru metod cyklowych lub węzłowych obliczania kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z. 65, 1972
61. Frycz A., Sułkowski J.: Wpływ rozczinki pola eksploatacyjnego na niezawodność utworzonego w nim systemu wentylacyjnego oddziału wydobywczego. Przegląd Górniczy, nr 10, 1978
62. Frycz A., Sułkowski J.: Obliczanie niezawodności funkcjonowania systemu wentylacyjnego oddziałów wydobywczych kopalń. Przegląd Górniczy, nr 11 – 12, 1983
63. Frycz A., Sułkowski J., Kolarczyk M.: Sposoby wymuszania i regulacji rozplywu powietrza w głębokich kopalniach rud miedzi. CUPRUM, nr 1-2, 1987
64. Frycz A., Sułkowski J., Kolarczyk M.: Multi-level positive and negative regulation of the distribution of air in the ventilation systems of mines. 25th international conference of safety in mines research institutes, september 1993

65. Frycz A., Zdrzałek G., Szadurski Z., Banaś K., Zaremba J., Nowicki K., Kolarczyk M.: Dotychczasowe doświadczenia w zakresie wdrażania obliczeń sieci wentylacyjnych w kopalniach Zabrzeńskiego Gwarectwa Węglowego z wykorzystaniem elektronicznej techniki obliczeniowej. Przegląd Górniczy, nr 11-12, 1988
66. Grabowski W.: Programowanie matematyczne. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1982
67. Grzywak A.: Konfigurowanie i oprogramowanie komputerowych systemów nadzoru i sterowania parametrami wentylacji w kopalniach. Wiadomości Górnicze, nr 7-8, 1977
68. Jankowska M.: Metoda oceny bezpieczeństwa prądów powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych. Konferencja „Głębokie Złoże” VI.2005. Jugowice
69. Kalinowski K.: Metody optymalizacji. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2000
70. Knechtel J.: Wyznaczanie potrzebnej ilości powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej w aspekcie nieprzekroczenia 28°C jego temperatury. Wiadomości Górnicze, nr 3, 2000
71. Kolarczyk M.: Własności i zastosowania charakterystyk podsieci i otoczenia w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Praca doktorska (niepublikowane)
72. Kolarczyk M.: Uwagi o gospodarce powietrzem w podziemnej kopani węgla kamiennego w okresie restrukturyzacji.
73. Kolarczyk M.: Definiowanie i wyznaczanie charakterystyk części kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt 188, rok 1990
74. Kolarczyk M.: Wpływ struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej na wrażliwości prądów powietrza przy zmianach oporów bocznic. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, zeszyt 214, Gliwice, 1993
75. Kolarczyk M.: Algorytmy wyznaczania stref zagrożeń przenoszonych przez prądy powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. W materiałach seminarium Vetranie a klimatyzacja w hlbinnych baniach. Koszyce-Herlany 1993
76. Kolarczyk M.: Bocznice normalne i przekątne w kopalnianej sieci wentylacyjnej metoda wyznaczania. XX Dni Techniki ROW`94
77. Kolarczyk M.: Wykorzystanie przekroju całkowitego przez sieć wentylacyjną do analizy gospodarki powietrzem w kopalni głębinowej. Materiały seminarium nt.: Aktualne problemy wentylacji, klimatyzacji i zwalczania pożarów w kopalniach podziemnych. Instytut Eksploatacji Złóż Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śl. w Gliwicach. Ustroń, listopad 1995
78. Kolarczyk M.: Przykłady charakterystyk zastępczych części kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt 232, 1996
79. Kolarczyk M.: Bocznice względem siebie przekątne, równoległe, quasi-równoległe, szeregowie i quasi-szeregowie w kopalnianej sieci wentylacyjnej. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art.10
80. Kolarczyk M.: Rezerwa wydatku powietrza w oddziale wydobywczym wynikająca z nachylenia charakterystyki otoczenia podsieci oddziałowej. XX Seminarium ROP, 2003
81. Kolarczyk M.: Wybrane właściwości pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w kopalnianej sieci wentylacyjnej. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 2004
82. Kolarczyk M.: Ekwiwalentnaja charaktiristika czasti wentiliacyjnoj sieti szachty pri rabotie wspomogotielnogo wientilatora. Sposoby i sriedstwa sozdania biezopasnych i zdarowych usłowij truda w ugotlnych szachtach. Makiejewka – Donbas, 2004

83. Kolarczyk M.: Przykłady pełnych macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w wybranych sieciach przekątnych. Konferencja „Głębokie Złoże” VI.2005. Jugowice
84. Kolarczyk M., Banaś K., Zaremba J., Nowicki K.: Topologia systemu programów numerycznej obróbki wyników pomiarów zdjęcia ilościowego i depresyjnego kopalnianej sieci wentylacyjnej. W materiałach konferencji „Matematyczne metody i technika komputerowa w górnictwie. T. 1. Wyd. COBPGO Poltegor i Politechnika Wrocławska. Wrocław – Szklarska-Poreba, 1987
85. Kolarczyk M., Gawenda A., Pach G.: Uwagi o możliwości oceny trwałości kierunku prądów przekątnych z wykorzystaniem wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic. 2 Szkoła Aerologii Górniczej, październik 2002
86. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Opór całkowity, charakterystyka zastępcza podsieci. Aerodynamika v hornictvi, Prosinec 2003
87. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Tworzenie cyfrowego modelu struktury sieci dualnej dla sieci płaskiej zredukowanej. Konferencja Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju, 2004, Gliwice
88. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Charakterystyki zastępcze otoczeń podsieci oddziałów wydobywczych w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Konferencja Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju, 2005, Gliwice
89. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Rozwinięcie charakterystyki zastępczej części kopalnianej sieci wentylacyjnej według wzoru Taylora. Konferencja Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju, 2006, Gliwice
90. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Szczególny przypadek doboru spiętrzeń dwóch wentylatorów głównych obliczeniach wymuszonego rozplywu powietrza w kopalni. Przegląd górniczy, nr 7 – 8, 2007
91. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: Wybrane właściwości struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej zawierającej prądy zależne. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Górnictwo z. 279, Gliwice 2007
92. Kosonowski J., Kozek B., Powaga L.: Analiza doboru stacji wentylatorów głównych dla kopalń Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Wiadomości Górnicze, nr 7, 1982
93. Kowalik S.: Nowoczesne metody optymalizacyjne w zastosowaniach górniczych i ekonomicznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004
94. Kowalik S.: Wybrane zagadnienia z matematyki. Wykłady dla doktorantów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007
95. Kozek B.: Analiza ekonomiczna wentylacji kopalń LZW w aspekcie zużycia energii elektrycznej. Wiadomości Górnicze, nr 6, 1982
96. Krzystanek Z., Kielar J., Szywacz J., Wasilewski S.: Obliczenia sieci wentylacyjnych na maszynie cyfrowej. Przegląd Górniczy, nr 4, 1979
97. Lasek S., Bohosiewicz M.: Ekonomiczne aspekty przewietrzania kopalń katowickiego holdingu węglowego w procesie restrukturyzacji technicznej. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 2004
98. Liberus Z., Solich F., Konarski A., Banaś M.: Obniżenie parametrów pracy głównego wentylatora kopalni w dni wolne od pracy. Przegląd Górniczy, nr 6, 1993
99. Linhart J.: Untersuchungen der Grubenbewetterung hinsichtlich ihrer Stabilität. Gluckauf 126, nr. 9/10, 1990
100. Lipczyk A., Matuszewski J., Wojtyczka A.: System obliczania parametrów sieci wentylacyjnej kopalni. Wiadomości Górnicze, nr 4 – 5, 1988
101. Lisiecki B., Bohosiewicz M.: Ekonomiczne aspekty przewietrzania kopalń katowickiego holdingu węglowego w procesie restrukturyzacji technicznej. Mechanizacja i automatyzacja górnictwa, nr 11, 1997

102. Łapa J.: Rozwój wentylacji głównej kopalń węgla kamiennego. Wiadomości Górnicze, nr 8, 1987
103. Madeja A., Strumiński A.: Intensywność przewietrzania wyrobisk górniczych o dużych polach przekrojów poprzecznych. Biuletyn Głównego Instytutu Górnictwa, nr 7-8, 1973
104. Matuszewski K.: Zadania służb wentylacyjnych w procesie technicznej restrukturyzacji kopalń. Wiadomości Górnicze, nr 7, 1995
105. Matuszewski K.: Racjonalizacja przewietrzania kopalń w procesie restrukturyzacji górnictwa węglowego. Przegląd Górniczy, nr 4, 1999
106. Musioł D.: Analiza układów przewietrzania rejonów ścian w podsięciach wentylacyjnych w aspekcie zagrożenia metanowego, pożarowego i termicznego. Wiadomości Górnicze, nr 6, 2000
107. Musioł D.: Optymalizacja ilości powietrza w restrukturyzowanych kopalniach węgla kamiennego. Politechnika Śląska, Gliwice. Praca doktorska (niepublikowane)
108. Musioł D., Sułkowski J.: Harmonogramowanie ilości powietrza w rejonach eksploatacyjnych jako sposób ograniczenia kosztów związanych z przewietrzaniem kopalń węgla kamiennego. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 2004
109. Nęcza Z., Sikora M., Urbański J.: Metoda badania skutków wpływu stanów awaryjnych na zaburzenia w rozplywie powietrza w sieciach wentylacyjnych kopalń LGOM. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 59, 1990
110. Pawiński J., Roszkowski J., Strzebiński J.: Przewietrzanie kopalń. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1979
111. Pollak R.: Das Zeichnen von Wetternetzplanen mit EDV-Anlagen. Glückauf 116, nr. 9, 1980
112. Rosiek F., Sikora M., Urbański J.: Wyznaczanie oporów bocznic dla potrzeb budowy cyfrowych modeli kopalnianych sieci wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 6, 1993
113. Roszczyniański W., Waclawik J.: Obliczenia i pomiary w aerologii górniczej. Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, skrypt uczelniany nr. 383, Kraków, 1974
114. Sadowski W.: Statystyka matematyczna. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1969
115. Sałustowicz A.: Obliczanie oporu ogólnego i regulacji ilości powietrza w złożonych systemach wentylacyjnych. Przegląd Górniczo – Hutniczy, nr 6, 1930
116. Sałustowicz A.: Regulacja odjemna i mieszana w złożonych systemach wentylacyjnych. Przegląd Górniczo – Hutniczy, nr 9, 1930
117. Sałustowicz A.: Przewietrzanie kopalń za pomocą kilku szybów wentylacyjnych. Przegląd Górniczo – Hutniczy, nr 11, 1931
118. Strumiński A.: Wyznaczanie naturalnego rozplywu powietrza w oczkach wewnętrznych pasywnych sieci wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 4, 1976
119. Strumiński A.: Metoda wyznaczania rozplywu powietrza w pasywnych sieciach wentylacyjnych z narzuconymi warunkami. Zeszyty problemowe górnictwa, zeszyt 1, 1977, tom XV
120. Strumiński A.: Metody autokorekcyjne wyznaczenia rozplywów wymuszonych powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych. Prace Głównego Instytutu Górnictwa, GIG, Katowice 1978
121. Strumiński A.: Projektowanie naturalno-wymuszonego rozplywu powietrza w kopalnianych sieciach wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 4, 1980
122. Strumiński A.: Optymalizacja rozplywów powietrza w projektowanych sieciach wentylacyjnych kopalń głębinowych. Część I, sieci pasywne. Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, 1985

123. Strumiński A.: Zwalczanie pożarów podziemnych w kopalniach. Wydawnictwo PAN Oddział we Wrocławiu, 1987
124. Strumiński A.: Aktywne i pasywne metody zwalczania pożarów podziemnych. Przegląd Górniczy, nr 9, 1997
125. Strumiński A., Madeja – Strumińska B.: O potrzebie uwzględnienia strat powietrza w obliczeniach wentylacyjnych. Konferencja „Głębokie Złoże” VI.2005. Jugowice
126. Strumiński A., Madeja – Strumińska B.: Praktyczny sposób wyznaczania oporów aerodynamicznych bocznic kopalnianych sieci wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 6, 1997
127. Strumiński A., Madeja- Strumińska B.: Optymalizacja wymuszonych rozpływów powietrza w warunkach skrępowanych oraz ocena wybranych zagrożeń w kopalniach podziemnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004
128. Strumiński A., Madeja- Strumińska B.: Projektowanie naturalno-wymuszonych rozpływów powietrza w kopalniach podziemnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004
129. Strumiński A., Rosiek F., Sikora M., Urbański J.: Zastosowanie wentylatorów swobodnych do regulacji rozpywu powietrza w kopalniach LGOM. Mechanizacja i automatyzacja górnictwa, nr 11, 1997
130. Sułkowski J.: Topologiczne kryterium odwikłania schematów kanonicznych sieci wentylacyjnych. Przegląd Górniczy, nr 2, 1970
131. Sułkowski J.: Rozwiązywalność podstawowych zagadnień teorii kopalnianej sieci wentylacyjnej w zależności od jej struktury. Pol. Śl. ITEZ Gliwice 1971 (niepublikowane)
132. Sułkowski J.: Związki między metodami obliczania rozpywu powietrza w sieciach wentylacyjnych kopalń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. s. Górnictwo, z. 52. Gliwice 1972, s. 403-412
133. Sułkowski J.: Mesure de la complexite de structure du reseau d'aerage minier. Archiwum Górnictwa, t. XVIII z. 1, 1973
134. Sułkowski J.: Wykorzystanie zasad dualizmu w algorytmie obliczania oporu całkowitego w sieciach wentylacyjnych normalnych. Zesz. Nauk, Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 70, Gliwice 1976
135. Sułkowski J.: Metody odwzorowania i miary struktur kopalnianych sieci wentylacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. s. Górnictwo, z. 115. Gliwice 1982
136. Sułkowski J.: Ciekawe przypadki i zdarzenia z ruchu kopalń – próba analizy z pozycji programowania wielokryterialnego. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 44
137. Sułkowski J., Szczurek A.: Energooszczędna wentylacja główna kopalni podziemnej. Przegląd Górniczy, nr 1, 2001
138. Sułkowski J., Wierzbński K.: Optymalizacja struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej jako wybór rozwiązania kompromisowego dla dwóch sprzecznych kryteriów jakości. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane, 2004
139. Szlązak J.: Przewietrzanie wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego. Wiadomości Górnicze, nr 9, 2001
140. Szlązak N., Borowski M., Obracaj D.: Określenie parametrów przewietrzania wyrobisk górniczych przy pracy maszyn samojezdnych z silnikami spalinowymi. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 39
141. Szlązak N., Tor A.: Wymiana ciepła przez organizm ludzki i możliwości jego termoregulacji. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 21
142. Trenczek S.: Stosowanie schodzących prądów powietrza w aspekcie zagrożeń naturalnych. Warsztaty 2006 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie”

143. Waclawik J.: Problemy wentylacji i klimatyzacji kopalń. 1 Szkoła Aerologii Górniczej, 1999, art. 15
144. Waclawik J., Branny M., Mikołajczyk W., Zabierowski J.: Propozycja obliczania optymalnej ilości powietrza w kopalni z uwagi na temperaturę. Przegląd Górniczy, nr 5, 1974
145. Wierzbński K.: Optymalizacja struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej ze względu na bezpieczeństwo ewakuacji górników zagrożonych pożarami w prądach grupowych powietrza świeżego. Politechnika Śląska, Gliwice. Praca doktorska (niepublikowane)
146. Wilson R.: Wprowadzenie do teorii grafów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1988
147. Woźnica C., Rodziewicz M.: Nowe rozwiązania regulacji rozplywu powietrza na wylotach z rejonów wentylacyjnych. Wiadomości Górnicze, nr 6. 1989
148. Yuusaku T., Isobe T.: Macroscopic characteristic of a complicated mine ventilation network. Mine Ventilation, Third International Congress, Harrogate, England, 1984
149. Zhen-cai W., Er-Yi Y.: Optimum method of regulating a ventilation network. Mine Ventilation, Third International Congress, Harrogate, England, 1984
150. Materiały działów TW kopalń węgla kamiennego i miedzi.