

Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej – etap II

WACŁAW DZIURZYŃSKI, ANDRZEJ KRACH, TERESA PAŁKA, STANISŁAW WASILEWSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Badania są kontynuacją prac nad rozwojem metod optymalizacji numerycznej w celu doboru parametrów modelu numerycznego wirtualnej kopalni. W tym celu wykorzystano dane rejestrowane przez czujniki systemu gazometrii automatycznej sieci wyrobisk kopalni. Wcześniejsze badania (etap I) pozwoliły na dokonanie wyboru i adaptacji metody optymalizacyjnej parametrów modelu matematycznego stosowanego w programie komputerowym *VentZroby*. Zastosowano miarę odległości wyników obliczeń symulacyjnych i danych z czujników systemu gazometrii automatycznej. Jako funkcję celu minimalizowaną metodą optymalizacji numerycznej przyjęto sumę kwadratów różnic wartości zmierzonych i prognozowanych z wagami. Zastosowana metoda i wykonane przykłady obliczeniowe w I etapie badań pozwoliły na sformułowanie wniosków, które stały się podstawą do rozwoju metody optymalizacji.

W omawianym etapie II dla symulacji numerycznej wybranego rejonu ściany ze zrobami, przygotowano wyniki z pomiarów ręcznych oraz dane z anemometrów stacjonarnych i czujników metanu systemu gazometrii dla rozważanego rejonu. Ponadto dla przyjętego modelu numerycznego wybranego rejonu wykonano obliczenia stanu początkowego rozplywu, tj. wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach i udziały objętościowe metanu w tych strumieniach. Następnie wykonano obliczenia walidacyjne dla wybranego rejonu, dla minimalizacji funkcji celu, z zastosowaniem zmodyfikowanej metody optymalizacji numerycznej realizowanej w trzech krokach obejmujących: zmiany oporów bocznicy sieci (minimalizacja dla strumieni objętości powietrza), zmiany wartości strumieni objętości metanu dopływających do sieci ze źródeł zewnętrznych (minimalizacja dla strumieni objętości metanu) oraz ponownie zmiany oporów bocznicy sieci (minimalizacja dla strumieni objętości powietrza).

Wykonane obliczenia walidacyjne dla wybranego rejonu z zastosowaniem zmodyfikowanej metodyki optymalizacji pokazały że wprowadzone w algorytmie estymacji zmiany przyniosły pozytywny rezultat, aczkolwiek należy dodać, że pojawiły się inne problemy wynikające z własności obiektu badań. W podsumowaniu uzyskanych wyników podkreślono, że ważnym zagadnieniem w obliczeniach walidacyjnych jest kontrola poprawności danych rejestrowanych w sieci wyrobisk kopalni przez czujniki prędkości powietrza i stężenia metanu systemu gazometrii automatycznej oraz prawidłowe określenie metodyki obliczania strumieni masy powietrza i metanu z danych rejestrowanych przez czujniki w bocznicach, w których znajdują się wymienione czujniki.

Słowa kluczowe: prognozowanie procesu przewietrzania, walidacja programu komputerowego, zagrożenie metanowe, bezpieczeństwo

1. Wstęp

W ramach prac statutowych IMG PAN, zgodnie z programem realizacji zadania pt. *Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej* (Dziurzyński i in., 2012), Zespół Pracowni Wentylacji Kopalń wykonał w roku 2012 pierwszy etap zadania, w którym dokonano wyboru i adaptacji metody optymalizacyjnej dla stosowanego w programie komputerowym programu *VentZroby* modelu matematycznego. Jako funkcję celu minimalizowaną wybraną metodą optymalizacji numerycznej wykorzystano miarę odległości danych z obliczeń symulacyjnych i danych z monitoringu w postaci sumy kwadratów różnic wartości zmierzonych i prognozowanych z wagami. W pierwszej kolejności opracowano algorytm automatycznej optymalizacji wybranego parametru modelu, którym jest strumień objętości przepływającego powietrza. Funkcją celu stanowi kwadrat odległości wektorów

stanu prognozowanego i rzeczywistego, przy czym składniki tych wektorów to strumienie objętości powietrza prognozowane, obliczone przez program *VentZroby* i obliczone na podstawie pomiarów prędkości przez anemometry systemu monitoringu rozmieszczone w wybranych wyrobiskach kopalni. Następnie opracowano algorytmy optymalizacji numerycznej, dla których ułożono nowe procedury programu komputerowego *VentZroby*. Do testowania procedur przygotowano przykład obliczeniowy, a odpowiedni model numeryczny oraz dane z czujników systemu monitoringu (gazometrii) pozwoliły na sprawdzenie poprawności działania przyjętej metody optymalizacji numerycznej procesu estymacji stanu sieci wentylacyjnej. Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Po początkowym okresie szybkiego spadku następuje okres wolnego zmniejszania się wartości funkcji celu, związany z malejącymi zmianami oporów bocznic, które z kolei wynikają z malejących wartości składowych gradientu funkcji celu w przyjętej metodzie optymalizacji. W związku z tym należy rozpatrzyć możliwość modyfikacji parametrów metody tak, aby uzyskać większą szybkość spadku wartości funkcji celu.
2. Z przebiegów zmiany oporów obliczanych w trakcie procesu estymacji w bocznicach, w których zainstalowane były czujniki prędkości przepływu powietrza systemu monitoringu wentylacji wynika, że procedura estymacji zakończyła się zbyt wcześnie, ponieważ wartości oporów obliczane dla tych bocznic nie osiągnęły stanu ustalonego. W następstwie należy zmienić kryterium zakończenia obliczeń w algorytmie estymacji, tj. zmniejszyć wartość graniczną, do której dąży moduł różnicy między poprzednią i następną wartością funkcji celu, obliczany w procesie iteracji.
3. Wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach, obliczone przez program *VentZroby* z modułem estymacji prognozy dla stanów przed i po estymacji, w większości przypadków pokazują zmiany w prawidłowym kierunku. Dokładniejsza analiza pokazuje, że przyjęty sposób obliczania wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach wyznaczanych z prędkości powietrza z zarejestrowanych przez anemometry systemu monitoringu jako wielkości wejściowych do obliczania funkcji celu z kryterium najmniejszej miary odległości, może prowadzić do błędnych wyników. Przebiegi prędkości powietrza rejestrowane w systemie gazometrii charakteryzują się silnymi zaburzeniami i losową zmiennością. Dlatego uznano, że należy rozważyć zmianę i jako wielkości wejściowe do obliczania miary odległości jako funkcji celu w procedurze estymacji przyjąć wartości strumieni objętości powietrza wyznaczone z uśrednionych prędkości powietrza w przedziale czasu wybranym z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki systemu monitoringu wentylacji w wytypowanych bocznicach.
4. Należy rozważyć wprowadzenie w funkcji celu współczynników wagi różnych od 1, aby zróżnicować udziały różnic strumieni objętości powietrza z symulacji i z monitoringu dla różnych bocznic.
5. Przedstawiony sposób estymacji prognozy rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni z zastosowaniem minimalizacji funkcji celu metodą gradientu (najszybszego spadku) realizuje prawidłowo zadanie minimalizacji i w kolejnym etapie może być rozszerzony o estymację prognozy udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach sieci z wykorzystaniem wartości udziałów rejestrowanych przez czujniki stężenia metanu systemu gazometrycznego kopalnianej sieci wentylacyjnej.

W drugim etapie realizacji zadania pt. „*Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej, etap II*” wykonano następujące prace:

1. Przygotowanie bazy danych do symulacji numerycznej wybranego rejonu ściany ze zrobami, obejmujące dane z pomiarów ręcznych, dane z anemometrów stacjonarnych oraz czujników stężenia metanu systemu gazometrycznego dla rozważanego rejonu.
2. Opracowanie modelu numerycznego, obliczenia stanu początkowego w rozplywie, tj. wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach i udziały objętościowe metanu w tych strumieniach.
3. Obliczenia walidacyjne dla wybranego rejonu z zastosowaniem przyjętej metodyki optymalizacji z uwzględnieniem zmian wynikających z wyżej przedstawionych wniosków z pierwszego etapu realizacji zadania.
4. Analiza wyników, podsumowanie, wnioski.

Do obliczeń walidacyjnych przyjęto przykład obliczeniowy z pierwszego etapu zadania uzupełniony o obliczenia udziałów objętościowych metanu. Pozwoliło to ocenić wpływ wprowadzonych zmian w algorytmie optymalizacji na wyniki obliczeń i porównać z wynikami otrzymanymi w etapie pierwszym.

2. Estymacja stanu sieci wentylacyjnej kopalni

Procedura estymacji modelu matematycznego stosowanego w programie symulacji przewietrzania kopalni ma doprowadzić do zgodności prognozy otrzymanej w wyniku symulacji numerycznej zadanego stanu procesu wentylacyjnego z wynikami pomiarów zarejestrowanymi przez czujniki systemu monitoringu. Do tego celu służy porównanie wyników otrzymanych z symulacji z wynikami pomiarów kopalnianych, czyli obliczenie miary odległości wektorów stanu. Ponieważ wartości obliczone w wyniku symulacji zależą od przyjętych parametrów modelu, to aby miara S wskazywała na wiarygodność modelu, parametry tego modelu muszą zostać zmodyfikowane tak, aby miara S jako funkcja celu w wybranej procedurze optymalizacji została zminimalizowana.

Estymacja stanu obiektu opiera się na minimalizacji funkcji celu, co uzyskano metodą gradientu (najszybszego spadku) (Gościński i in., 1974). W metodzie najszybszego spadku oblicza się gradient funkcji celu

$$\mathbf{G} = \nabla S \quad \text{gdzie} \quad G_m = -2 \sum_{n=1}^N w_n \frac{\partial f_n}{\partial x_m} [y_{pn} - f_n(x_1, x_2, \dots, x_M)] \quad (1)$$

gdzie

- y_{pn} – wielkość zmierzona,
- x_m – parametr modelu obiektu,
- $f_n(x_1, x_2, \dots, x_M)$ – funkcja wiążąca estymowane wielkości y_n z parametrami x_m ,
- w_n – współczynnik wagi.

Następnie oblicza się nowe wartości zmiennych $x_1 \dots x_M$

$$x_{Nm} = x_m - \beta G_m \quad \text{dla} \quad m = 1 \dots M \quad (2)$$

gdzie β – wielkość przesunięcia w kierunku wyznaczonym przez gradient \mathbf{G} .

Pochodne $\frac{df_n}{dx_m}$ w wzorze (1) nazywają się współczynnikami wrażliwości.

Ponownie oblicza się funkcję celu S i sprawdza się, czy osiągnęła minimum lokalne. Jeżeli nie, to powtarza się obliczanie nowych wartości zmiennych $x_1 \dots x_M$ i funkcji celu aż do osiągnięcia minimum lokalnego. Wówczas oblicza się nowy gradient \mathbf{G} , a następnie powtarza się obliczanie nowych wartości zmiennych $x_1 \dots x_M$ i funkcji celu aż do osiągnięcia kolejnego minimum lokalnego. Obliczenia kontynuuje się do osiągnięcia minimum funkcji celu S .

W zastosowaniu do sieci wentylacyjnej kopalni, modelowanej w programie komputerowym *VentZroby*, przyjęto dochodzenie do rozwiązania w trzech krokach:

1. W pierwszym kroku program optymalizacji numerycznej zmienia opory bocznic sieci w bazie danych programu *VentZroby* tak, aby obliczone w modelu wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci, w których zainstalowane są anemometry stacjonarne systemu monitoringu wentylacji jak najbardziej, w sensie przyjętego kryterium, zbliżyły się do wartości strumieni objętości obliczonych na podstawie prędkości powietrza mierzonych przez czujniki tego systemu.
2. W drugim kroku program optymalizacji zmienia zapisane w bazie danych programu *VentZroby* wartości strumieni objętości metanu dopływających do sieci ze źródeł zewnętrznych tak, aby obliczone wartości udziałów objętościowych metanu w bocznicach sieci, w których zainstalowane są metanomierze systemu monitoringu jak najbardziej, w sensie przyjętego kryterium, zbliżyły się do wartości mierzonych przez metanomierze tego systemu.
3. W trzecim kroku minimalizowana jest funkcja celu taka jak w kroku drugim, przez zmianę oporów bocznic sieci. W wyniku ma nastąpić poprawa zgodności stanu prognozowanego i mierzonego udziałów objętościowych metanu i możliwe pogorszenie zgodności stanu prognozowanego i mierzonego strumieni objętości powietrza. Takie podejście uzasadnione jest tym, że mierzone strumienie objętości powietrza charakteryzują się dużą niepewnością. Wartość strumienia objętości powietrza obliczana jest jako iloczyn miejscowej (punktowej) prędkości powietrza, mierzonej przez stacjonarny anemometr systemu monitoringu, pola powierzchni przekroju bocznicy i współczynnika korekcyjnego, a wielkości te mają duże niepewności pomiaru. Wynika to z faktu, że anemometry stacjonarne najczęściej nie są okresowo wzorcowane, pole przekroju wyrobiska jest szacowana z dużym przybliżeniem, a współczyn-

nik korekcyjny, który służy do przeliczenia prędkości miejscowej na średnią w przekroju, najczęściej jest pomijany przez przyjęcie jego wartości równej 1. Dlatego celowe jest zbliżenie prognozy udziałów objętościowych metanu w strumieniach powietrza w bocznicach do udziałów objętościowych metanu mierzonych przez czujniki systemu gazometrii, nawet kosztem pewnego pogorszenia funkcji celu dla strumieni objętości powietrza w bocznicach.

Program optymalizacji w pierwszym kroku minimalizuje funkcję celu w postaci

$$S_Q = \sum_{i=1}^I (Q_{Vi} - Q_{VMi})^2 \quad (3)$$

gdzie

Q_{Vi} – strumień objętości powietrza w boczniczy nr i obliczony przez program *VentZroby* jako funkcja oporów bocznic sieci $Q_{Vi} = f_i(R_1 \dots R_j)$,

Q_{VMi} – strumień objętości powietrza w boczniczy nr i zmierzony przez czujnik prędkości powietrza systemu monitoringu wentylacji zainstalowany w tej boczniczy.

Kolejne wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach Q_{Vi} program *VentZroby* oblicza dla kolejnych wartości oporów bocznic

$$R_{Nj} = R_j - \beta G_j \quad \text{dla } j = 1 \dots J \quad (4)$$

gdzie składowa gradientu $\mathbf{G} = \nabla S_R$ funkcji celu S_R jest równa

$$G_j = 2 \sum_{i=1}^I \frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} (Q_{Vi} - Q_{VMi}) \quad (5)$$

Współczynnik wrażliwości $\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j}$ w wzorze (21) jest tożsamy z wskaźnikiem wrażliwości strumienia objętości powietrza w boczniczy nr i na zmianę oporu boczniczy nr j (Kolarczyk, 2004).

Program *VentZroby* oblicza współczynniki wrażliwości stosując przybliżenie pochodnej $\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j}$ w otoczeniu R_j

$$\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} = 2a_{Ri,j}R_j + b_{Ri,j} \quad (6)$$

gdzie współczynniki $a_{Ri,j}$ i $b_{Ri,j}$ są współczynnikami paraboli estymującej zależność $Q_{Vi} = f(R_j)$

$$Q_{Vi} = a_{Ri,j}R_j^2 + b_{Ri,j}R_j + c_{Ri,j} \quad (7)$$

Obliczenie tych współczynników wymaga rozwiązania sieci wentylacyjnej dla trzech wartości oporu R_j :

$$Q_{Vi1} = f(R_{j1}) \quad Q_{Vi2} = f(R_{j2}) \quad Q_{Vi3} = f(R_{j3}) \quad (8)$$

Dla wartości oporów boczniczy nr j wyrażonych jak niżej

$$R_{j1} = R_j, \quad R_{j2} = R_j + \Delta R, \quad R_{j3} = R_j - \Delta R \quad (9)$$

i przyjmując, że ΔR jest pewnym ułamkiem u_R wartości oporu R_j otrzymuje się:

$$R_{j2} = (1 + u_R)R_j, \quad R_{j3} = (1 - u_R)R_j \quad (10)$$

Współczynnik wrażliwości obliczony dla tych wartości oporu jest równy

$$\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} = \frac{Q_{Vi2} - Q_{Vi3}}{2u_R R_j} \quad (11)$$

W drugim kroku program optymalizacji minimalizuje funkcję celu w postaci

$$S_C = \sum_{n=1}^N (C_{Vn} - C_{VMn})^2 \quad (12)$$

gdzie

C_{Vn} – udział objętościowy metanu w powietrzu w boczniczy nr n obliczony przez program *VentZroby* jako funkcja strumieni objętości dopływu metanu ze źródeł zewnętrznych $C_{Vn} = f_n(q_1 \dots q_M)$,
 C_{VMn} – udział objętościowy metanu w powietrzu w boczniczy nr n zmierzony przez czujnik metanu systemu monitoringu wentylacji zainstalowany w tej boczniczy.

W drugim kroku program *VentZroby* oblicza kolejne wartości udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach C_{Vn} dla kolejnych wartości strumieni objętości metanu dopływających z źródeł zewnętrznych q_m .

$$q_{Nm} = q_m - \gamma H_m \quad (13)$$

gdzie składowa gradientu $\mathbf{H} = \nabla S_C$ funkcji celu S_C jest równa

$$H_m = 2 \sum_{n=1}^N \frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} (C_{Vn} - C_{VMn}) \quad (14)$$

gdzie $\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m}$ – współczynnik wrażliwości udziału objętościowego metanu w powietrzu w boczniczy nr n na zmianę strumienia objętości dopływu metanu z źródła nr m .

Program *VentZroby* oblicza współczynniki wrażliwości stosując przybliżenie pochodnej $\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m}$ w otoczeniu q_m

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} = 2a_{Cn,m} q_m + b_{Cn,m} \quad (15)$$

gdzie współczynniki $a_{Cn,m}$ i $b_{Cn,m}$ są współczynnikami paraboli estymującej zależność $Q_{Vn} = f(q_m)$

$$C_{Vn} = a_{Cn,m} q_m^2 + b_{Cn,m} q_m + c_{Cn,m} \quad (16)$$

Obliczenie tych współczynników wymaga rozwiązania sieci wentylacyjnej dla trzech wartości strumienia objętości dopływu metanu z źródła q_m

$$Q_{Vn1} = f(q_{m1}), \quad Q_{Vn2} = f(q_{m2}), \quad Q_{Vn3} = f(q_{m3}) \quad (17)$$

Dla wartości strumienia objętości dopływu metanu z źródła nr m wyrażonych jak niżej

$$q_{m1} = q_m, \quad q_{m2} = q_m + \Delta q, \quad q_{m3} = q_m - \Delta q \quad (18)$$

i przyjmując, że Δq jest pewnym ułamkiem u_C wartości strumienia objętości dopływu metanu z źródła q_m , otrzymuje się:

$$q_{m2} = (1 + u_C)q_m, \quad q_{m3} = (1 - u_C)q_m \quad (19)$$

Współczynnik wrażliwości obliczony dla tych wartości strumieni objętości metanu jest równy

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} = \frac{C_{Vn2} - C_{Vn3}}{2u_C q_m} \quad (20)$$

W trzecim kroku program *VentZroby* oblicza kolejne wartości udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach C_{Vn} dla kolejnych wartości strumieni objętości powietrza, realizowanych przez zmiany oporów bocznic.

$$R_{Nj} = R_j - \delta J_j \quad \text{dla } j = 1 \dots J \quad (21)$$

gdzie składowa gradientu $J = \nabla S_{CQ}$ funkcji celu S_{CQ} jest równa

$$J_j = 2 \sum_{n=1}^N \frac{\partial C_{Vn}}{\partial R_j} (C_{Vn} - C_{VMn}) \quad (22)$$

gdzie $\frac{\partial C_{Vn}}{\partial R_j}$ – współczynnik wrażliwości udziału objętościowego metanu w powietrzu w boczniczy nr n na zmianę oporu boczniczy nr m .

Program *VentZroby* oblicza współczynniki wrażliwości stosując przybliżenie pochodnej $\frac{\partial C_{Vn}}{\partial R_j}$ w otoczeniu R_j

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial R_j} = 2a_{CQn,j}R_j + b_{CQn,j} \quad (23)$$

gdzie współczynniki $a_{CQn,j}$ i $b_{CQn,j}$ są współczynnikami paraboli estymującej zależność $Q_{Vn} = f(R_j)$

$$C_{Vn} = a_{CQn,j}R_j^2 + b_{CQn,j}R_m + c_{CQn,j} \quad (24)$$

Obliczenie tych współczynników wymaga rozwiązania sieci wentylacyjnej dla trzech wartości oporów boczniczy R_j

$$C_{Vn1} = f(R_{j1}), \quad C_{Vn2} = f(R_{j2}), \quad C_{Vn3} = f(R_{j3}) \quad (25)$$

Dla wartości oporu boczniczy nr j wyrażonych wzorami (9) i przyjmując, że ΔR jest pewnym ułamkiem u_{CQ} wartości oporu boczniczy R_j , otrzymuje się:

$$R_{j2} = (1 + u_Q)R_j, \quad R_{j3} = (1 - u_Q)R_j \quad (26)$$

Współczynnik wrażliwości obliczony dla tych wartości strumieni objętości metanu jest równy

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial R_j} = \frac{C_{Vn2} - C_{Vn3}}{2u_{CQ}R_j} \quad (27)$$

Dla estymacji stanu rozplywu powietrza w bocznicach sieci wentylacyjnej na podstawie funkcji celu konieczna jest znajomość wartości strumieni objętości powietrza wyznaczonych w programie symulacji i obliczonych na podstawie prędkości powietrza zarejestrowanych przez czujniki systemu monitoringu wentylacji kopalni. Czujnikami tymi są anemometry stacjonarne, mierzące lokalną prędkość powietrza w miejscu zainstalowania w przekroju wyrobiska. Dlatego dla danych z systemu monitoringu należy obliczać strumień objętości powietrza w wyrobisku z wzoru

$$Q_V = cAv \quad (28)$$

gdzie

- v – prędkość powietrza mierzona przez anemometr stacjonarny systemu monitoringu wentylacji
- A – pole przekroju wyrobiska w miejscu zainstalowania anemometru,
- c – współczynnik korekcyjny uwzględniający nierównomierność profilu prędkości powietrza w tym przekroju.

Zarejestrowane w systemie monitoringu przebiegi prędkości powietrza charakteryzują się dużą zmiennością wartości chwilowych, przy czym w tych przebiegach (sygnałach) można wyróżnić dwie składowe zakłóceń: szybkozmienną i wolnozmienną. Składowa szybkozmienna jest związana z fluktuacjami prędkości powietrza występującymi w przepływie burzliwym, natomiast składowa wolnozmienna (Wasilewski, 1996), związana jest z ruchem kopalni, czyli otwieraniem i zamykaniem tam wentylacyjnych i drzwi w tamach, ruchem pociągów kopalnianych, ruchem klatek w szybach itp. Dlatego zarejestrowane przebiegi prędkości powietrza są poddawane filtracji cyfrowej w celu eliminacji tych obu zakłóceń i uzyskania składowej uży-

tecznej prędkości powietrza reprezentującej stan rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej, która może być przeliczana na strumień objętości powietrza.

Ponieważ procedura estymacji stanu rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni odnosi się do stanu ustalonego, to z wyznaczonych na podstawie prędkości powietrza rejestrowanych przez anemometry w systemie monitoringu strumieni objętości powietrza należy wyznaczyć wartości średnie prędkości powietrza w danym przedziale czasu. W tej pracy przyjęto, że jako dane wejściowe do procesu estymacji strumieni objętości powietrza będą wartości średnie z przebiegów prędkości powietrza zarejestrowane przez czujniki systemu monitoringu w danym przedziale czasu.

Podobne uwarunkowania jak dla estymacji rozplywu powietrza w sieci dotyczą estymacji stanu udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach sieci.

3. Algorytm estymacji zastosowany w programie *VentZroby*

Estymację stanu sieci przeprowadzono w trzech kolejnych krokach stosując minimalizację funkcji celu metodą gradientu (najszybszego spadku):

- dla rozplywu powietrza w bocznicach sieci przez regulację wartości oporów bocznic,
- dla udziałów objętościowych metanu w bocznicach sieci przez regulację wartości dopływów metanu (źródła),
- dla udziałów objętościowych metanu w bocznicach sieci przez regulację strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci dokonywanej przez zmianę oporów bocznic.

Algorytm obliczeń numerycznych wykorzystywany w tym celu w programie *VentZroby* podano poniżej. Przyjęto następujące oznaczenia: k – nr iteracji, S_Q – funkcja celu dla strumieni objętości powietrza zmienianych przez zmianę oporów bocznic sieci, S_C – funkcja celu dla udziałów objętościowych metanu zmienianych przez zmianę strumieni dopływów źródłowych metanu do sieci, S_{CQ} – funkcja celu dla udziałów objętościowych metanu zmienianych przez zmianę oporów bocznic sieci, \mathbf{R} , \mathbf{Q} , \mathbf{C} – wektory oporów bocznic sieci, strumieni objętości powietrza i udziałów objętościowych metanu w tych bocznicach.

1. Obliczyć wartości strumieni objętości powietrza na podstawie średnich prędkości powietrza w wybranym przedziale czasowym zarejestrowanych przez system monitoringu przebiegów w bocznicach nr $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$, w których znajdują się anemometry stacjonarne i udziałów objętościowych metanu w bocznicach nr $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$, w których znajdują się metanomierze systemu monitoringu. Do dalszych obliczeń jako wartości strumieni objętości powietrza i udziałów objętościowych metanu otrzymane z systemu monitoringu przyjąć obliczone wartości średnie.
2. Obliczyć strumień objętości powietrza i udziały objętościowe metanu w bocznicach dla danego modelu sieci wentylacyjnej kopalni.
3. Obliczyć współczynniki α_Q i α_C

$$\alpha_Q = \frac{\left(a_Q \sum_i^I Q_{Vi} \right)^2}{I} \qquad \alpha_C = \frac{\left(a_C \sum_{ni}^N C_{Vn} \right)^2}{N}$$

gdzie

- Q_{Vi} – strumień objętości powietrza w bocznicy z czujnikiem prędkości powietrza,
- I – ilość czujników prędkości powietrza,
- a_Q – stała, tu przyjęto $a_Q = 0,001$,
- C_{Vn} – udział objętościowy metanu w powietrzu w bocznicy z czujnikiem metanu,
- N – ilość czujników metanu,
- a_C – stała, tu przyjęto $a_C = 0,01$.

4. Obliczyć wszystkie kolumny tablicy współczynników wrażliwości strumieni objętości powietrza $\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}$.
5. W tablicy współczynników wrażliwości wybrać wiersze $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$.

6. Wybrać największą wartość modułu współczynnika wrażliwości $\max\left(\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|\right)$ w każdym wierszu $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$ tablicy wrażliwości i unormować wszystkie współczynniki wiersza tablicy (podzielenie modułów współczynników wrażliwości $\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|$ przez $\max\left(\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|\right)$ danego wiersza: $\frac{\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|}{\max\left(\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|\right)}$.
7. Wybrać w wierszach $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$ tablicy współczynników wrażliwości $\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}$ współczynniki spełniające warunek $\frac{\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|}{\max\left(\left|\frac{dQ_{Vi}}{dR_j}\right|\right)} > k$ ($k < 1$) czyli dla każdego i_n ze zbioru $(i_1, i_2, i_3, \dots, i_I)$ otrzymuje się numery bocznic $j_1, j_2, j_3, \dots, j_J$ (są to numery kolumn tablicy współczynników wrażliwości). Operacja ta powoduje odrzucenie z dalszych obliczeń tych bocznic, w których zmiany oporu mają mały wpływ na wartość strumienia objętości powietrza w bocznicach $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$. Przykładowo, przyjęcie $k = 0,05$ powoduje pominięcie w obliczeniach bocznic, w których zmiany oporu mają wpływ na strumień objętości w danej bocznicy nr j_m mniejszy niż 5% w stosunku do bocznicy o największym wpływie.
8. Obliczyć funkcję celu $S_Q = \sum_{i=1}^I (Q_{Vi} - Q_{VMi})^2$ gdzie Q_{VMi} jest to strumień objętości powietrza w bocznicy i z monitoringu, wybrany w punkcie 1, a Q_{Vi} jest to strumień objętości powietrza w tej bocznicy otrzymany w wyniku obliczeń w programie *VentZroby*.
9. Obliczyć gradient funkcji celu $\frac{dS_Q}{dR_j} = 2 \sum_{i=1}^I \frac{dQ_{Vi}}{dR_j} (Q_{Vi} - Q_{VMi})$ dla strumieni objętości powietrza w bocznicach nr $i_1, i_2, i_3, \dots, i_I$ przy zmianach oporu bocznic nr $j_1, j_2, j_3, \dots, j_J$
10. Obliczyć współczynnik β_Q : $\beta_Q = \frac{r_Q}{\max\left(\left|\frac{dS_Q}{dR_j}\right|\right)}$ dla $j = j_1, j_2, j_3, \dots, j_J$ gdzie $r_Q = \frac{\Delta R}{R}$.
- Tu przyjęto $r_Q = 0,1$.
11. Obliczyć nowe wartości R_j : $R_j = R_j - \beta_Q \frac{dS_Q}{dR_j}$.
12. Obliczyć nowy rozptyw powietrza w sieci w programie *VentZroby*.
13. Obliczyć nową wartość funkcji celu $S_{Q,k}$.
14. Sprawdzić warunki:
- $|S_{Q,k-1} - S_{Q,k}| \leq a_Q \Rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{R}_k, \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_k$, koniec estymacji stanu rozptywu powietrza,
 - $(S_{Q,k} < S_{Q,k-1}) \wedge (|S_{Q,k-1} - S_{Q,k}| < b_Q) \Rightarrow \beta_Q = n \cdot \beta_Q$, powrót do punktu 11, (tu przyjęto $b_Q = 10a_Q$ i $n = 2$),
 - $S_{Q,k} > S_{Q,k-1} \Rightarrow S_{Q,k} = S_{Q,k-1}$, powrót do punktu 8 (pomijając punkt 10 po pierwszym cyklu obliczeniowym).
 - $|S_{Q,k-1} - S_{Q,k}| > a_Q \Rightarrow S_{Q,k} = \min(S_{Q,k-1}, S_{Q,k})$, powrót do punktu 11.
15. Obliczyć wszystkie kolumny tablicy współczynników wrażliwości udziałów objętościowych metanu $\frac{dC_{Vn}}{dq_m}$.

16. W tablicy współczynników wrażliwości wybrać wiersze $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$
17. Obliczyć funkcję celu $S_C = \sum_{n=1}^N (C_{Vn} - C_{VMn})^2$ gdzie C_{VMn} jest to udział objętościowy metanu w boczniczy n z monitoringu, wybrany w punkcie 1, a C_{Vn} jest to udział objętościowy metanu w tej boczniczy otrzymany w wyniku obliczeń w programie *VentZroby*.
18. Obliczyć gradient funkcji celu $\frac{dS_C}{dq_m} = 2 \sum_{n=1}^N \frac{dC_{Vn}}{dq_m} (C_{Vn} - C_{VMn})$ dla udziałów objętościowych metanu w bocznicach nr $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$ przy zmianach strumieni objętości metanu dopływających z źródeł nr $m_1, m_2, m_3, \dots, m_M$.
19. Obliczyć współczynnik β_C : $\beta_C = -\frac{r_C}{\max\left(\left|\frac{dS_C}{dq_m}\right|\right)}$ dla $m = m_1, m_2, m_3, \dots, m_M$ gdzie $r_C = \frac{\Delta q}{q}$.
- Tu przyjęto $r_C = 0,1$.
20. Obliczyć nowe wartości q_m : $q_m = q_m - \beta_C \frac{dS_C}{dq_m}$.
21. Obliczyć nowe wartości udziałów objętościowych metanu w sieci w programie *VentZroby*.
22. Obliczyć nową wartość funkcji celu $S_{C,k}$
23. Sprawdzić warunki:
- $|S_{C,k-1} - S_{C,k}| \leq \alpha_C \Rightarrow \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_k, \mathbf{C} = \mathbf{C}_k$, koniec estymacji stanu udziałów objętościowych metanu, jeżeli nie, to $S_{C,k} = \min(S_{C,k-1}, S_{C,k})$,
 - $(S_{C,k} < S_{C,k-1}) \wedge (|S_{C,k-1} - S_{C,k}| < b_C) \Rightarrow \beta_C = n \cdot \beta_C$, powrót do punktu 20, (tu przyjęto $b_C = 10a_C$ i $n = 2$),
 - $S_{C,k} > S_{C,k-1} \Rightarrow S_{C,k} = S_{C,k-1}$, powrót do punktu 18 (pomijając punkt 19 po pierwszym cyklu obliczeniowym).
 - $|S_{Q,k-1} - S_{Q,k}| \leq \alpha_Q \Rightarrow S_{C,k} = \min(S_{C,k-1}, S_{C,k})$, powrót do punktu 20.
24. Obliczyć wszystkie kolumny tablicy współczynników wrażliwości strumieni objętości powietrza $\frac{dC_{Vn}}{dR_j}$.
25. W tablicy współczynników wrażliwości wybrać wiersze $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$
26. Wybrać największą wartość modułu współczynnika wrażliwości $\max\left(\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|\right)$ w każdym wierszu $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$ tablicy wrażliwości i unormować wszystkie współczynniki wiersza tablicy (podzielenie modułów współczynników wrażliwości $\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|$ przez $\max\left(\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|\right)$ danego wiersza: $\frac{\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|}{\max\left(\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|\right)}$)
27. Wybrać w wierszach $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$ tablicy współczynników wrażliwości $\frac{dC_{Vn}}{dR_j}$ współczynniki spełniające warunek $\frac{\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|}{\max\left(\left|\frac{dC_{Vn}}{dR_j}\right|\right)} > k$ ($k < 1$) czyli dla każdego n_n ze zbioru $(n_1, n_2, n_3, \dots, n_N)$ otrzy-

muje się numery bocznic $l_1, l_2, l_3, \dots, l_L$ (są to numery kolumn tablicy współczynników wrażliwości). Operacja ta powoduje odrzucenie z dalszych obliczeń tych bocznic, w których zmiany oporu mają mały wpływ na wartość udziału objętościowego metanu w bocznicach $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$.

28. Obliczyć funkcję celu $S_{CQ} = \sum_{n=1}^N (C_{Vn} - C_{VMn})^2$ gdzie C_{VMn} jest to udział objętościowy metanu w boczniczy n z monitoringu, wybrany w punkcie 1, a C_{Vn} jest to udział objętościowy metanu w tej boczniczy otrzymany w wyniku obliczeń w programie *VentZroby*.

29. Obliczyć gradient funkcji celu $\frac{dS_{CQ}}{dR_l} = 2 \sum_{n=1}^N \frac{dC_{Vn}}{dR_l} (C_{Vn} - C_{VMn})$ dla udziałów objętościowych metanu w bocznicach nr $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$ przy zmianach oporu bocznic nr $l_1, l_2, l_3, \dots, l_L$.

30. Obliczyć współczynnik β_{CQ} : $\beta_{CQ} = \frac{r_{CQ}}{\max\left(\left|\frac{dS_{CQ}}{dR_l}\right|\right)}$ dla $l = l_1, l_2, l_3, \dots, l_L$ gdzie $r_{CQ} = \frac{\Delta R}{R}$.

Tu przyjęto $r_{CQ} = 0,1$.

31. Obliczyć nowe wartości R_l : $R_l = R_l - \beta_{CQ} \frac{dS_{CQ}}{dR_l}$.

32. Obliczyć nowe udziały objętościowe metanu w sieci w programie *VentZroby*.

33. Obliczyć nową wartość funkcji celu $S_{CQ,k}$

34. Sprawdzić warunek:

- $|S_{CQ,k-1} - S_{CQ,k}| \leq a_C \Rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{R}_k, \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_k, \mathbf{C} = \mathbf{C}_k$, koniec estymacji stanu udziałów objętościowych metanu,
- $(S_{CQ,k} < S_{CQ,k-1}) \wedge (|S_{CQ,k-1} - S_{CQ,k}| < b_{CQ}) \Rightarrow \beta_{CQ} = n \cdot \beta_{CQ}$, powrót do punktu 31, (tu przyjęto $b_{CQ} = 10a_{CQ}$ i $n = 1$),
- $S_{CQ,k} > S_{CQ,k-1} \Rightarrow S_{CQ,k} = S_{CQ,k-1}$, powrót do punktu 29 (pomijając punkty 30 po pierwszym cyklu obliczeniowym).
- $|S_{CQ,k-1} - S_{CQ,k}| > a_C \Rightarrow S_{CQ,k} = \min(S_{CQ,k-1}, S_{CQ,k})$, powrót do punktu 31.

4. Zastosowanie procedur optymalizacji dla celów walidacji modelu – przykład

Jako przykład testujący przedstawią koncepcję automatycznej estymacji modelu matematycznego rozptyłu powietrza i zawartości metanu w sieci wentylacyjnej wybrano rejon ściany 5 pokład 409, który był wykorzystany w obliczeniach walidacyjnych w pierwszym etapie zadania. Pozwoliło to na porównanie wyników estymacji modelu matematycznego rozptyłu powietrza uzyskanych w I etapie z wynikami uzyskanymi w obecnym etapie, po wprowadzeniu do algorytmu poprawek sformułowanych we wnioskach z pierwszego etapu.

Dane z systemu gazometrii automatycznej z dnia pomiarów 05.12.2009 przedstawiono na wykresach zmian prędkości, rys. 10 (linia ciągła ze znacznikiem), a miejsce lokalizacji czujników anemometrycznych i metanomierzy przedstawiono w Tabeli 1.

Na rysunku 1 pokazano schemat obejmujący rozważaną strukturę połączeń wyrobisk i zrobów oraz przyjęty model numeryczny dla stanu eksploatacji w ścianie 5 o długości 240 metrów i dla 1200 metrowego jej wybiegu. Dla planowanych obliczeń symulacji i badań walidacyjnych wykonano wstępny bilans metanowy rejonu ściany 3 (zlikwidowanej) i ściany 5 dla stanu przepływu po szczelnym otamowaniu wlotu i wylotu do ściany 5. Wartości dla wstępnego bilansu zostały ustalone na podstawie analizy dostępnych danych pochodzących z rejestracji w systemie gazometrii automatycznej (Tabela 1). Przyjęto, że do obszaru zrobów ściany 3 dopływ metanu jest na poziomie $1,1 \text{ m}^3/\text{min}$, a do zrobów ściany 5 dopływ wynosi $12 \text{ m}^3/\text{min}$.

Tab. 1. Parametry czujników z systemu gazometrii w KWK Wujek Ruch Śląsk w czasie eksperymentu wyłączenia wentylatora lutniowego

| Lp. | Numer linii czujnika | Numer czujnika | Jednostka | Typ | Lokalizacja |
|-----|----------------------|----------------|---------------------|--------|--|
| 1 | SA:102 | V102 | [m/s] | SAS-2 | Przekop do pokładu 409 – 50 m na płn. od chodnika wentylacyjnego badawczego |
| 2 | SA:103 | V103 | [m/s] | SAS-2 | Pochylnia transportowa 417K, do 50 m od przecinki 2/502J |
| 3 | SA:105 | V105 | [m/s] | SAS-2 | Dowierzchnia badawcza 3/409, do 10 m na pld. od przecinki 2/409 |
| 4 | SA:108 | V108 | [m/s] | SAT-1F | Pochylnia wentylacyjna 417K, około 30 m na płn. od łącznicy 2 |
| 5 | SA:116 | V116 | [m/s] | SAT-1F | Przekop pld.-zach. 1050, 100 m od przekopu południowego 1050 m |
| 6 | SA:118 | V118 | [m/s] | SAS-2 | Przecinka 3/409 – do 20 m na zach. od dowierzchni centralnej |
| 7 | SA:209 | M209 | [%CH ₄] | MM-2 | Poch. taśmowa 417K 10-15 m na pld od dowierzchni badawczej 1 |
| 8 | SX:041 | M291 | [%CH ₄] | MM-2P | Przecinka 3/409 – 5m od wylotu z mieszalnika inżektorowej stacji odmetanowania |
| 9 | SA:227 | M227 | [%CH ₄] | MM-2PW | Pochylnia taśmowa 417K, przy rozdzielnicy RE-11 |
| 10 | SX:067 | M317 | [%CH ₄] | MM-2PW | Dowierzchnia badawcza 1/409 – 10 m na południe od przecinki 1 |

W prezentowanych dalej rozważaniach dla sprawdzenia poprawności algorytmu estymacji prognozy rozplywu powietrza przyjęto, że miara odległości S_Q wektorów strumieni objętości powietrza w bocznicach z symulacji i z monitoringu i miary odległości S_C i S_{CQ} wektorów udziałów objętościowych metanu w bocznicach z symulacji i z monitoringu wyznaczone będą na podstawie obliczeń strumieni objętości powietrza i udziałów objętościowych metanu wykonanych w programie *VentZroby* i na podstawie wartości strumieni objętości powietrza i udziałów objętościowych metanu obliczonych z przebiegów zarejestrowanych w bocznicach przez czujniki systemu monitoringu, w których znajdowały się czujniki prędkości powietrza i stężenia metanu systemu monitoringu.

Jako podstawę do obliczeń miary odległości S_Q przyjęto strumienie objętości powietrza wyznaczone na podstawie średnich wartości prędkości powietrza zarejestrowanych przez sześć anemometrów, a do obliczeń miary odległości S_C i S_{CQ} przyjęto wartości udziałów objętościowych metanu wyznaczone jako średnie z przebiegów czasowych zarejestrowanych przez 4 czujniki stężenia metanu (Tabela 1).

W pierwszym etapie działania algorytmu optymalizacji prowadzącym do estymacji prognozy rozplywu powietrza otrzymanej z modelu matematycznego stosowanego w programie *VentZroby* program porównuje wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach otrzymane z symulacji numerycznej z wynikami rejestrowanymi przez czujniki w kopalnianym systemie gazometrii. Procedura estymacji w programie komputerowym oblicza wartości średnie z przebiegów strumienia objętości powietrza zarejestrowanych przez czujniki prędkości powietrza systemu monitoringu w danym przedziale czasu. Wartości te zostają przyjęte jako wielkości wejściowe do obliczania miary odległości jako funkcji celu w procedurze estymacji. Procedura automatycznie tak zmienia opory bocznic sieci w modelu sieci wentylacyjnej kopalni, aby zminimalizować funkcję celu, czyli zminimalizować różnice między wartościami strumieni objętości powietrza obliczonymi przez program symulacyjny *VentZroby* i wartościami średnimi, wyznaczonymi z przebiegów prędkości powietrza zarejestrowanych przez system monitoringu kopalni.

W drugim etapie program porównuje wartości udziałów objętościowych metanu w powietrzu obliczonych przez program symulacyjny *VentZroby* z wartościami średnimi wyznaczonymi z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki stężenia metanu systemu gazometrii. Program minimalizuje funkcję celu, czyli tak zmienia wartości strumieni objętości źródeł dopływu metanu w modelu sieci wentylacyjnej kopalni, aby zminimalizować różnice między udziałami objętościowymi metanu obliczonymi przez program symulacyjny *VentZroby* i wartościami średnimi tych udziałów wyznaczonymi z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki stężenia metanu w systemie monitoringu kopalni. W rozpatrywanym przykładzie źródłami dopływu metanu są dopływy do dwóch zrobów.



Rys. 1. Schemat przestrzenny otomowanego rejonu ściany 3, 4 i 5 pokł. 409, model numeryczny

W trzecim etapie program minimalizuje funkcję celu taką samą jak w etapie drugim, ale nie przez zmianę intensywności dopływów metanu do zrobów, lecz przez zmiany oporów bocznic sieci, które powodują zmiany strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci i przez to powodują zmiany udziałów masowych metanu.

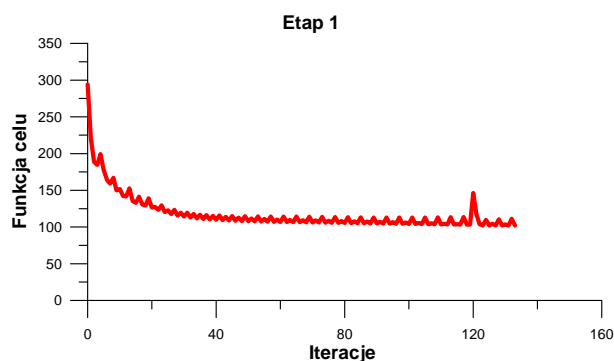
5. Omówienie wyników estymacji modelu sieci wentylacyjnej kopalni

Poniżej pokazano następujące wykresy:

- zmiany funkcji celu w czasie iteracji dla wyżej wymienionych trzech etapów obliczeń, zmiany oporów bocznic w pierwszym etapie w funkcji ilości iteracji,
- zmiany prędkości powietrza w bocznicach w funkcji ilości iteracji w stosunku do prędkości średnich zarejestrowanych przez czujniki prędkości umieszczone w tych bocznicach,
- zmiany udziałów objętościowych metanu w funkcji ilości iteracji w bocznicach, w których były czujniki metanu, w stosunku do średnich udziałów objętościowych metanu zarejestrowanych przez te czujniki w drugim i trzecim etapie,
- przebiegi zmian prędkości powietrza zarejestrowane przez czujniki prędkości z zaznaczonymi wartościami średnimi tych przebiegów oraz wartościami prędkości przed i po estymacji.

Na Rys. 2 pokazano zmianę funkcji celu w funkcji ilości iteracji dla pierwszego etapu, w którym następuje zmniejszanie różnic między wartościami strumieni objętości powietrza w bocznicach, obliczonymi

przez program *VentZroby* i średnimi wartościami strumieni objętości powietrza wyznaczonymi z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki prędkości powietrza systemu monitoringu kopalni. Odcinki o gładkim przebiegu odpowiadają krokom iteracji ze stałym gradientem. Charakterystyczne ząbki na przebiegu odpowiadają obliczaniom nowej wartości gradientu. Nagły wzrost wartości funkcji celu przy 120 kroku iteracji wynika z zwiększenia przyrostów oporów bocznic, co następuje przy różnicy wartości funkcji celu dla dwóch kolejnych kroków iteracji mniejszych od przyjętej ustalonej wartości.



Rys. 2. Przebieg funkcji celu dla pierwszego etapu estymacji i kolejnych iteracji

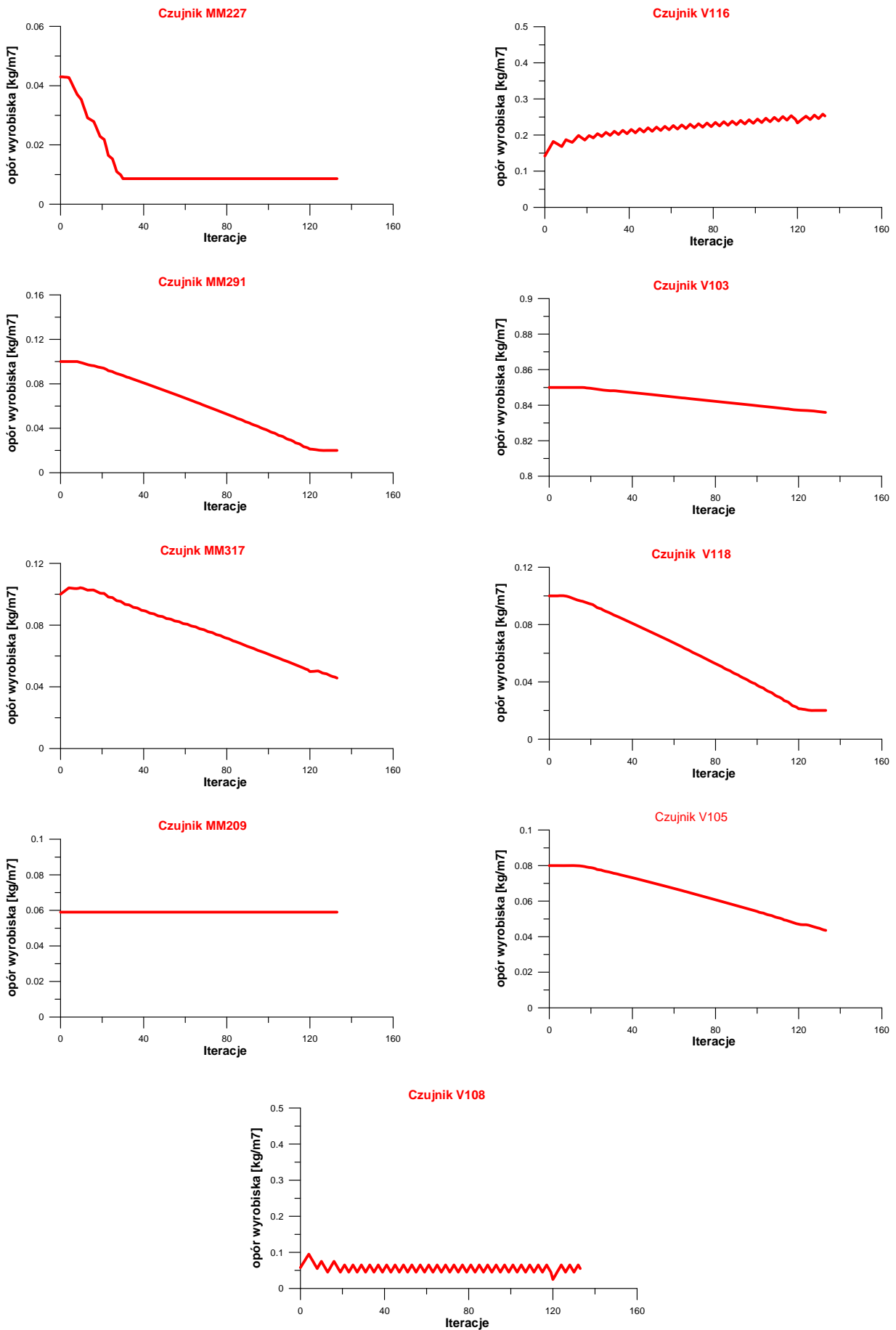
Na Rys. 3 pokazano zmiany wartości oporów aerodynamicznych bocznic, w których były zainstalowane czujniki prędkości powietrza (V103, V105, V108, V116, V118) oraz czujniki stężenia metanu (MM209, MM227, MM291, MM317) systemu monitoringu kopalni, w funkcji ilości iteracji dla etapu pierwszego, czyli estymacji rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni. Można zauważyć, że opór bocznicy z czujnikiem MM227 szybko osiąga dolną wartość graniczną, którą ustalono na 20% wartości początkowej oporu. Pod koniec iteracji dolną wartość graniczną osiąga również opór bocznicy z czujnikiem MM291 i V118. Górną wartość graniczną dla oporu ustalono na 300% wartości początkowej oporu danej bocznicy. Można również zauważyć, że opór bocznicy z czujnikiem MM209 prawie się nie zmienia, co oznacza, że opór tej bocznicy ma niewielki wpływ na strumień objętości powietrza w bocznicach z czujnikami prędkości powietrza V103, V105, V108, V116 i V118.

Zmianom wartości oporów bocznic, wyliczonym przez program estymacji, towarzyszą zmiany prędkości powietrza w tych bocznicach. Na Rys. 4 pokazano te zmiany wraz z naniesionymi wartościami średnimi przebiegów prędkości powietrza zarejestrowanych przez czujniki systemu monitoringu kopalni.

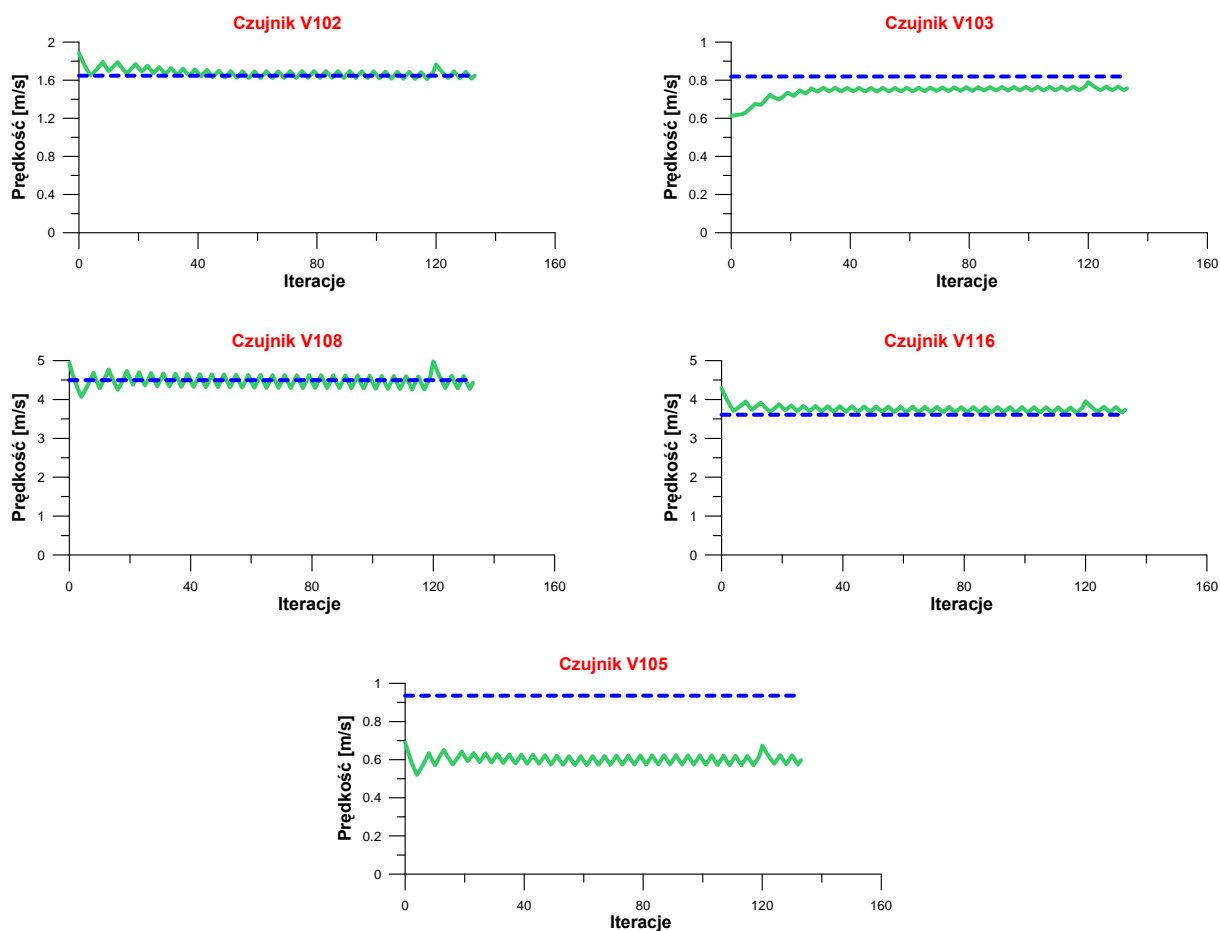
Jak można zauważyć, z wyjątkiem bocznicy z czujnikiem V105, gdzie nie występuje zmniejszanie różnicy prędkości z monitoringu (linia przerywana) i z estymacji (linia ciągła), w pozostałych przypadkach następuje wyraźna poprawa estymowanego stanu rozplywu powietrza, czyli zbliżenie wartości prędkości powietrza obliczonych przez program do prędkości średnich otrzymanych z systemu monitoringu sieci wentylacyjnej kopalni.

W drugim etapie estymacji stanu sieci wentylacyjnej podjęto próbę przybliżenia udziałów objętościowych metanu obliczonych przez program *VentZroby* do średnich wartości udziałów objętościowych metanu wyznaczonych z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki stężenia metanu systemu gazometrii kopalnianej. Zmiany symulowanych udziałów objętościowych metanu otrzymywano przez zmiany wydajności źródeł dopływu metanu do dwóch zrobów w modelu kopalnianej sieci wentylacyjnej. Funkcją celu, pokazaną na Rys. 5, był, w tym przypadku, kwadrat odległości wektorów udziałów objętościowych metanu symulowanych i zarejestrowanych.

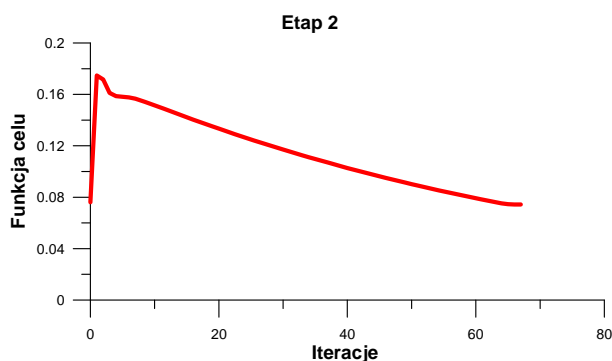
Jak pokazuje Rys. 5 końcowa wartość funkcji celu nie jest mniejsza niż wartość początkowa, co wskazuje, że w tym przypadku próba doprowadzenia do zgodności udziałów objętościowych metanu symulowanych przez program komputerowy *VentZroby* i zarejestrowanych przez czujniki stężenia metanu w bocznicach sieci wentylacyjnej nie powiodła się. Potwierdzają to przebiegi zmian strumieni objętości dopływu metanu do zrobów, pokazane na Rys. 6. Dopływ metanu do zrobów ściany 3 szybko osiąga górną wartość graniczną, która ustalona została na poziomie 150% wartości początkowej. Również dopływ metanu do zrobów ściany 5 osiąga górną wartość graniczną po ok. 60 krokach iteracji. Dolna wartość graniczna przyjęta została na poziomie 50% wartości początkowej.



Rys. 3. Zmiany oporu aerodynamicznego podczas iteracji w wybranych bocznicach rejonu – część I estymacji



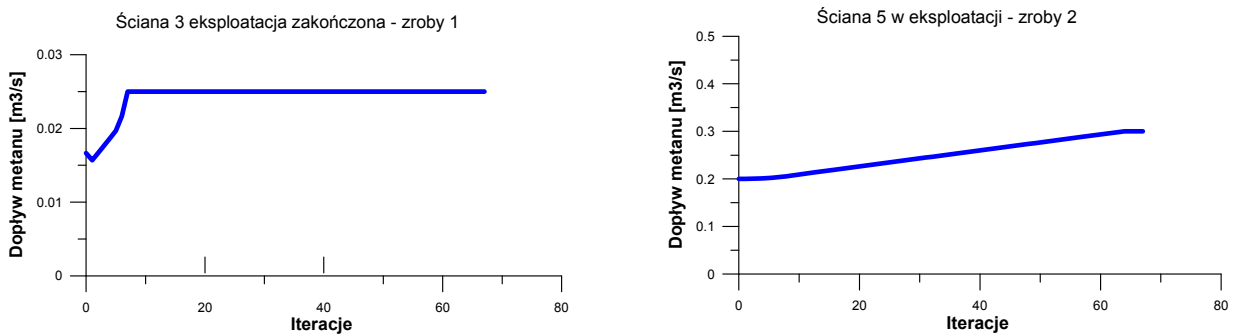
Rys. 4. Zmiany prędkości przepływu (linia ciągła) podczas iteracji w wybranych bocznicach rejonu – część I estymacji, linia przerywana – średnia z rejestracji czujnika monitoringu



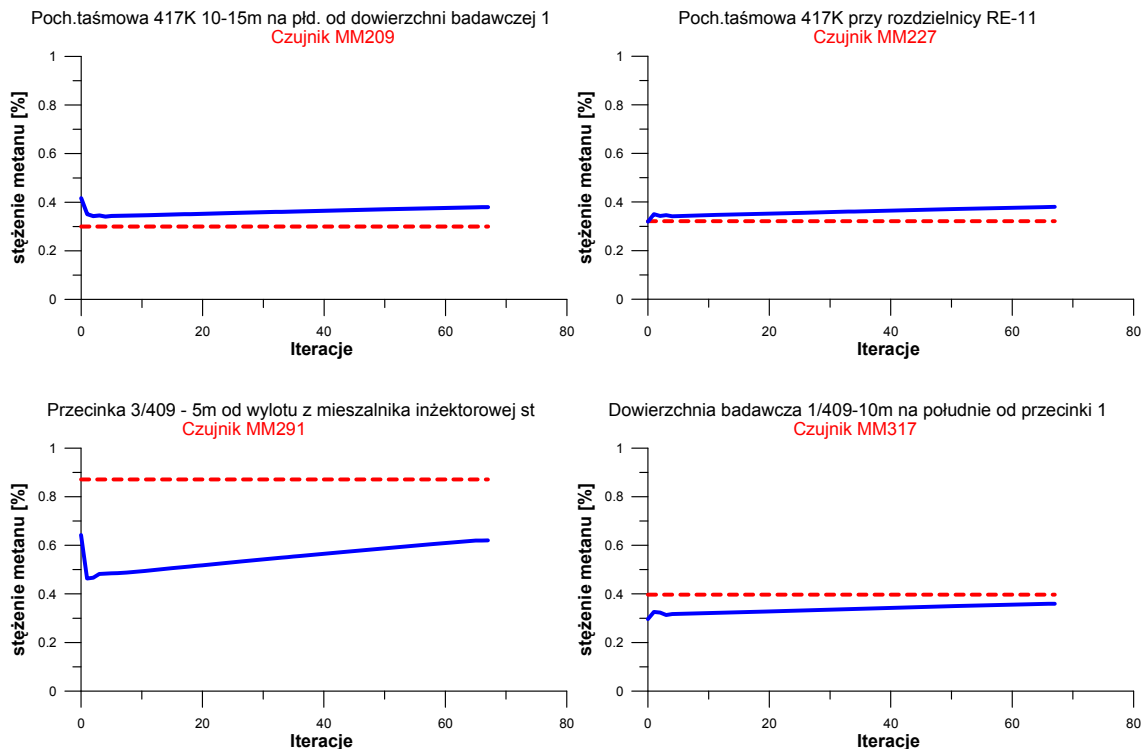
Rys. 5. Przebieg funkcji celu dla drugiego etapu estymacji i kolejnych iteracji

Zmiany dopływu metanu do zrobów w programie VentZroby symulującym stan wentylacji kopalni powodują zmiany udziałów objętościowych metanu w bocznicach sieci. Zmiany te pokazano na Rys. 7, gdzie linia przerywana pokazuje średnią wartość udziału objętościowego metanu, obliczoną z przebiegu zarejestrowanego przez czujnik stężenia metanu systemu gazometrii kopalnianej, a linia ciągła jest to udział objętościowy metanu obliczany przez program *VentZroby* w kolejnych krokach estymacji.

Tylko w bocznicy z czujnikiem stężenia metanu MM317 występuje zbliżenie symulowanej wartości udziału objętościowego metanu i obliczonej z średniej wartości z przebiegu zarejestrowanego przez ten czujnik. W bocznicach z czujnikami MM209 i MM291 wartości końcowe różnic udziałów masowych metanu z symulacji i rejestracji nie są mniejsze niż wartości początkowe, a w bocznicy z czujnikami MM227 różnica ta powiększa się z kolejnymi krokami iteracji. W takiej sytuacji próba poprawy stanu symulowanych



Rys. 6. Zmiany dopływu metanu do zrobów podczas iteracji – część II estymacji

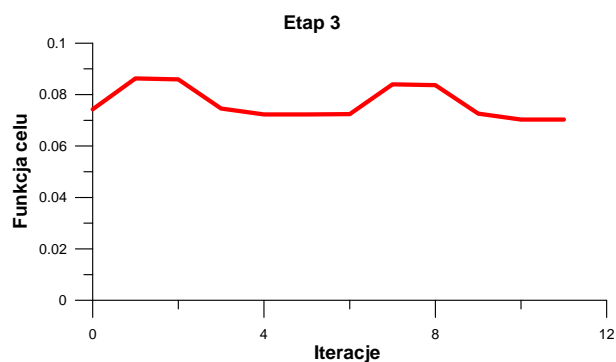


Rys. 7. Zmiany stężenia metanu podczas iteracji w wybranych bocznicach rejonu – część II estymacji

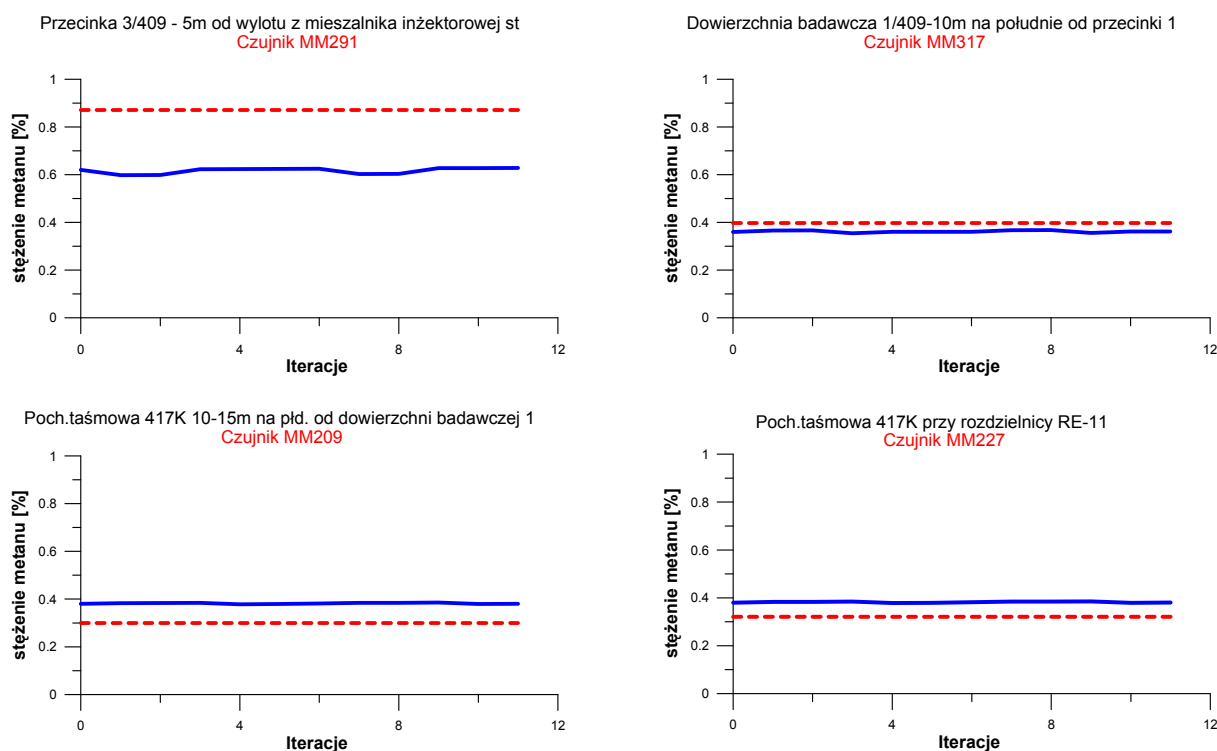
udziałów objętościowych metanu przez zmiany strumieni objętości powietrza w bocznicach, wywołanych zmianami oporów aerodynamicznych bocznic w trzecim etapie estymacji stanu sieci wentylacyjnej, nie mogła przynieść spodziewanych rezultatów, co pokazuje przebieg zmian funkcji celu (Rys. 8).

Takiemu obrazowi funkcji celu odpowiada brak zmian wartości udziałów objętościowych metanu w bocznicach, prowadzących do zmniejszania się różnic między udziałami objętościowymi metanu obliczonymi przez program *VentZroby* dla kolejnych kroków iteracji (linia ciągła) i średnimi wartościami udziałów objętościowych metanu wyznaczonymi z przebiegów zarejestrowanych przez czujniki stężenia metanu systemu gazometrii kopalnianej (linia przerywana), co pokazuje Rys. 9. Na tym rysunku uwidoczniono udziały objętościowe metanu w bocznicach z czujnikami stężenia metanu MM209, MM227, MM291 i MM317.

Ponieważ w trzecim etapie estymacji stanu wentylacji kopalni nie zaobserwowano zmian udziałów objętościowych metanu (Rys. 9), to można stwierdzić, że zmiany strumieni objętości powietrza w tym etapie estymacji musiały być niewielkie i o estymowanym stanie rozplywu powietrza w sieci decyduje etap pierwszy. Wartości prędkości powietrza przed i po estymacji na tle zarejestrowanych przez czujniki prędkości przebiegów i z zaznaczeniem średnich wartości tych przebiegów w bocznicach z czujnikami prędkości pokazano na Rys. 10. Rysunek pokazuje prędkości powietrza w bocznicach z czujnikami prędkości V102, V103, V105, V108, V116 i V118 systemu monitoringu sieci wentylacyjnej kopalni. Linia ciągła zaznaczo-



Rys. 8. Przebieg funkcji celu dla trzeciego etapu estymacji i kolejnych iteracji

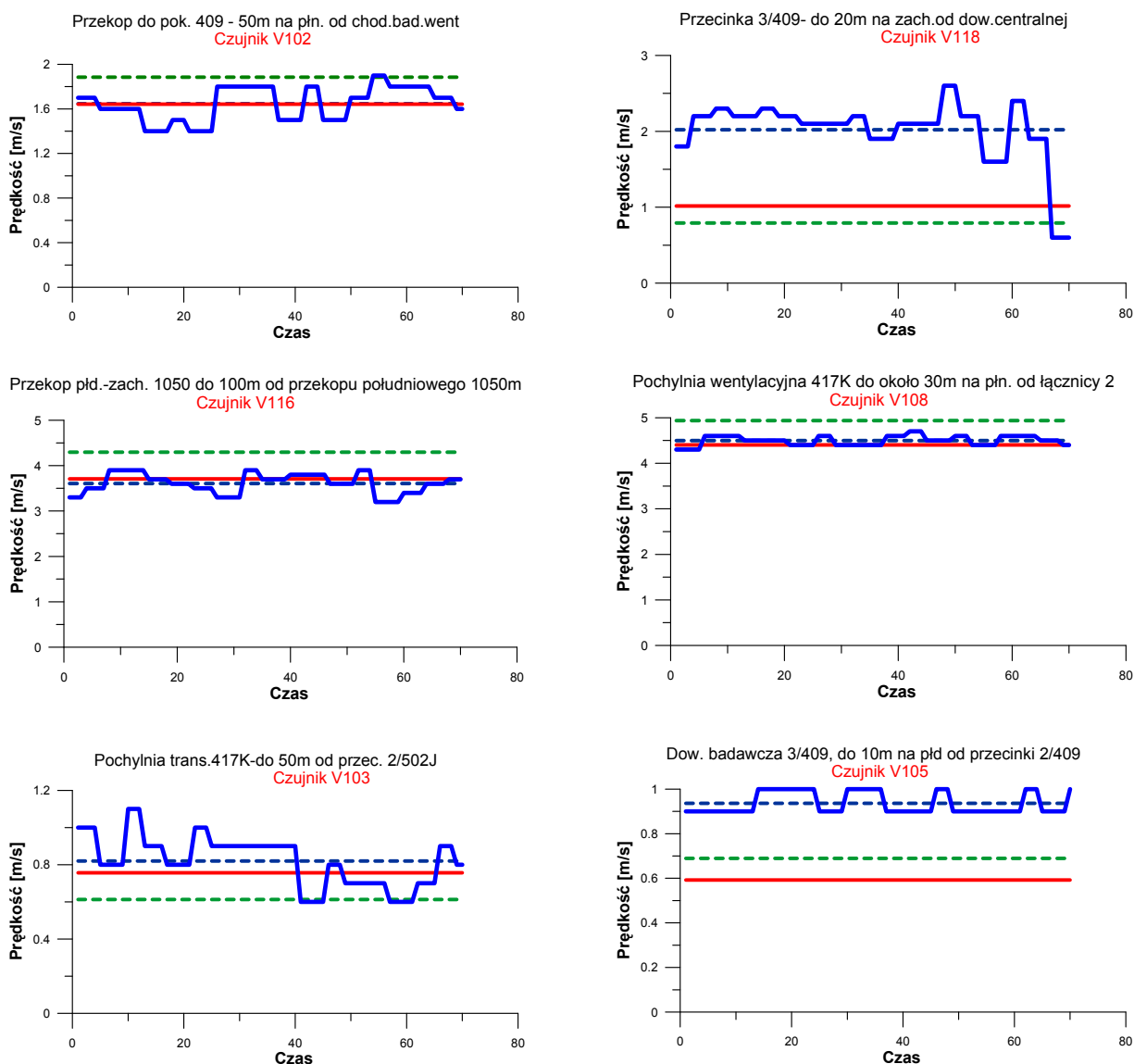


Rys. 9. Zmiany stężenia metanu podczas iteracji w wybranych bocznicach rejonu – część III estymacji

no przebieg zmian prędkości powietrza zarejestrowany przez czujnik, linia przerywana pokazuje wartość średnią tego przebiegu, linia przerywana-jasna pokazuje prędkość symulowaną przez program *VentZroby* przed estymacją modelu sieci wentylacyjnej, a linia ciągła-jasna – prędkość powietrza po estymacji. Jak można zauważyć, tylko w jednym przypadku, w bocznicy z czujnikiem prędkości powietrza V105, wystąpił wzrost różnicy średniej prędkości powietrza mierzonej przez czujnik i prędkości estymowanej. W pozostałych bocznicach w wyniku estymacji nastąpiło zbliżenie prędkości powietrza symulowanych przez program *VentZroby* do średnich wartości prędkości mierzonych przez czujniki systemu zainstalowane w bocznicach sieci wentylacyjnej kopalni.

6. Podsumowanie

Porównując uzyskane obecnie wyniki z wynikami otrzymanymi w pierwszym etapie realizacji zadania (Dziurzyński i in., 2012) dla tego samego przykładu, można stwierdzić, że w poprzednim etapie, oprócz pogorszenia wartości estymowanej prędkości powietrza w bocznicy z czujnikiem V105, takie pogorszenia wystąpiło w bocznicy z czujnikiem V118. W obecnym etapie realizacji zadania w tej bocznicy nastąpiła poprawa wyniku i dalsze zbliżenie prędkości estymowanej do średniej prędkości mierzonej. Z tego wynika,



Rys. 10. Przebieg prędkości na kolejnych czujnikach anemometrycznych systemu gazometrycznego oraz odpowiadające wyniki symulacji linia przerywana-jasna – stan przed estymacją – linia ciągła-jasna – stan po estymacji

że wprowadzone w algorytmie estymacji zmiany, wymienione we wstępie (rozd. 1 tego opracowania), dały pozytywny rezultat.

W przypadku poszukiwania przyczyn niezadowolającego wyniku estymacji stanu udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach w modelu w stosunku do udziałów objętościowych zmierzonych, przyczyn tych można upatrywać w tym, że w modelu sieci wentylacyjnej wyspecyfikowano tylko dwa źródła dopływu metanu, tj. dopływy metanu do zrobów. W rzeczywistości takich źródeł można wskazać więcej, np. z urabianej calizny węglowej, z odstawianego urobku, co powoduje, że udziały objętościowe metanu mierzone przez czujniki metanu i udziały obliczone przez program *VentZroby* są rozbieżne i okazuje się, że zmiany strumieni objętości metanu dopływającego tylko z dwóch źródeł nie są w stanie doprowadzić do zgodności udziałów objętościowych metanu obliczonych na podstawie danych mierzonych i otrzymanych w wyniku symulacji.

Ponadto istnieje jeszcze zagadnienie wiarygodności wyników pomiarów prędkości powietrza i udziałów objętościowych metanu w kopalnianym systemie gazometrii automatycznej. Jeżeli wynik pomiaru prędkości powietrza lub udziału objętościowego metanu przyjęte dla obliczenia średniej w przekroju wyrobiska wartości prędkości powietrza i udziału objętościowego metanu są błędne, a dodatkowo jest nieprecyzyjne oszacowanie pola powierzchni przekroju wyrobiska oraz współczynników korekcyjnych niezbędnych do wyznaczenia strumienia masy powietrza i metanu w bocznicach, to tak obliczone wartości, mogą nie speł-

niać równań bilansu strumieni masy w węzłach sieci wentylacyjnej, co uniemożliwia zbliżenie wyników symulacji numerycznej do wyników pomiarów. Reasumując, uzyskane wyniki z badań przedstawionych w etapie I i II pozwalają stwierdzić, że mimo zauważalnego postępu w zakresie zwiększenia liczby i unowocześnienia czujników pomiarowych w kopalnianym systemie gazometrii automatycznej, to jednak efekty ich wykorzystania do celów walidacji są ciągle niezadawalające. Dotyczy to również wykorzystania przez służby wentylacyjne kopalni wskazań tych czujników do bieżącej kontroli wentylacji. Ponieważ prawidłowy model sieci wentylacyjnej kopalni otrzymuje się tylko z wiarygodnych wyników pomiarów wentylacyjnych w sieci rzeczywistej, to ważnym zagadnieniem jest sprawdzenie poprawności wyników pomiarów czujników prędkości powietrza i czujników stężenia metanu systemu monitoringu sieci wentylacyjnej kopalni oraz prawidłowe określenie współczynników korekcyjnych, koniecznych do obliczenia strumieni masy powietrza i metanu w bocznicach, w których znajdują się wymienione czujniki systemu gazometrycznego.

Wykonane obliczenia walidacyjne dla wybranego rejonu z zastosowaniem zmodyfikowanej metodyki optymalizacji pokazały, że wprowadzone w algorytmie estymacji zmiany dały pozytywny rezultat, aczkolwiek należy dodać, że pojawiły się inne problemy wynikające z własności obiektu badań oraz konieczności opracowania metod dla poprawy wiarygodności jakości danych pomiarowych o parametrach powietrza w wyrobiskach kopalni pozyskiwanych za pomocą czujników systemu monitoringu.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2008. *Walidacja programu VentZroby z wykorzystaniem wyników eksperymentu „in situ” i z zastosowaniem nowych algorytmów przygotowania danych wejściowych*. Prace IMG PAN, t. 10, nr 1-4, s. 67-102.
- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2009. *Walidacja procedur programu VentZroby z wykorzystaniem systemu monitoringu stanu atmosfery kopalni*. Prace IMG PAN, t. 11, nr 1-4, s. 79-112.
- Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S., 2012. *Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej*. Prace IMG PAN, t. 14, nr 1-4, s. 121-137.
- Gościński A., Łazarski E., Nawarecki E., 1974. *Problemy sterowania złożonymi procesami*. AGH, Skrypty uczelniane, Nr 464, wyd. 2.
- Kolarczyk M., 2004. *Wybrane właściwości pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w kopalnianej sieci wentylacyjnej*. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane.
- Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., 2007. *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalń głębinowych*. Archiwum Górnictwa, Seria Monografia, nr 1, Kraków.
- Wasilewski S., 1996. *Badania przepływu powietrza w kopalni*. Arch. Min. Sci., Vol. 41, No 4, p. 411- 438.
- Wasilewski S., Bojarski K., Kurpas M., 2007. *Badania eksperymentalne stanów nieustalonych parametrów powietrza w ścianie w czasie urabiania kombajnem*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, Nr 6(437), czerwiec 2007, Wyd. EMAG, Katowice.
- Wasilewski S., Cimr A., Wach M., 2010. *Ocena zagrożenia pożarowego w zrobach przestrzeniach otamowanych za pomocą czujników gazometrii automatycznej*, XXXVI Dni Techniki ROP 2010, XXVII Seminarium Pożary Podziemne – Teoria i Praktyka, s. 145-161.

Validation of a computer model for prognosticating the ventilation, conditions in mines using the numerical optimisation methods

Abstract

This study summarises the next stage of research efforts aimed at development of numerical optimisation methods to support the selection of parameters of the numerical model of a virtual mine. The data registered by the automatic network of gas detector sensors in a mine are recalled and utilised. In the previous stage (step I) the optimisation method was selected and adapted to incorporate the parameters of the mathematical model used in the programme VentZroby. The measure of distance between simulation data and the data from the automatic network of gas sensors was applied. The objective function was taken as the mean squared difference of measured and predicted values, with appropriate weights attached. The applied procedures and calculations performed during the stage I led us to the conclusions underlying the development of the current optimisation method.

A longwall region, including both galleries and goaf has been selected. The stage II uses the results of manual measurements and the data collected from stationary anemometers and methane detector sensors in the area. Furthermore, the initial conditions of gas flows were obtained for the adopted numerical model of the wall region, including the volumetric flow rate of air streams in the branches and volumetric fraction of methane in the air streams. That was followed by a validation procedure applied to investigate the given area, the goal being the minimisation of the objective function using the modified method of numerical optimisation involving three steps: changing the flow resistance in network branches (minimisation of the volumetric airflow rates), altering the flow rate of methane entering the network from external sources (minimisation of the methane inflow rates) and repeated change of the flow resistance in network branches (minimisation of the volumetric airflow rates).

Calculations for the specified face region by the modified optimisation methods performed for the purpose of validation revealed that the changes implemented in the estimation algorithm produced positive results though some new problems arose associated with the specificity of the investigated object. The conclusion emphasises that the correctness and adequacy of data registered by the anemometers and gas detector sensors within the automatic network have to be rigorously checked prior to the validation procedure. Besides, the proper methodology of calculating the flow rates of air and methane based on the data from sensors located in network branches has to be precisely determined.

Keywords: forecastin of the ventilation conditions, validation of the computer programme, methane hazard, work safety