

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

WACŁAW DZIURZYŃSKI, ANDRZEJ KRACH, TERESA PAŁKA, STANISŁAW WASILEWSKI

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

Streszczenie

Dotychczasowe doświadczenia z zakresu walidacji modelu matematycznego zastosowanego w programie komputerowym *VentZroby* pokazują, że jest to zagadnienie trudne, przede wszystkim z powodu konieczności dysponowania dostatecznie dużą liczbą zarejestrowanych w kopalni przebiegów przejściowych porównywanych wielkości. Przyjęto, że wiarygodność prognozy procesu przewietrzania sieci wyrobisk kopalni opracowanej na podstawie symulacji jest ściśle związana z wiarygodnością poziomu dopasowania zastosowanego w programie symulacji modelu do rzeczywistej sieci wentylacyjnej kopalni.

Walidację modelu matematycznego przeprowadzono poprzez weryfikację wyników otrzymanych na drodze obliczeń numerycznych i porównanie ich z wynikami otrzymanymi z pomiarów za pomocą czujników systemu monitoringu wentylacji wyrobisk kopalni. Wykonane w latach 2000-2011 badania walidacyjne prowadzone były w oparciu o jakościowe kryteria obserwowanych przebiegów czasowych wyników symulacji (Dziurzyński i in., 2001, 2005, 2007a, 2007b, 2008, 2009, 2011). Do walidacji programów symulacyjnych stosowano procedurę wykorzystującą miarę odległości danych z prognozy i danych z monitoringu w postaci sumy kwadratów różnic wartości zmierzonych i prognozowanych z wagami. Obecnie zaproponowano, że miara taka jest funkcją celu minimalizowaną wybraną metodą optymalizacji numerycznej. Miara odległości szeregów czasowych dobrze nadaje się do zastosowania w numerycznych metodach minimalizacji funkcji celu, co pozwoliło na podjęcie próby automatyzacji procesów weryfikacji parametrów modelu matematycznego zastosowanego w programie *VentZroby*.

W pierwszej kolejności opracowano algorytm automatycznej optymalizacji wybranego parametru modelu, którym jest strumień objętości przepływającego powietrza. Funkcją celu stanowi unormowany kwadrat odległości wektorów stanu prognozowanego i rzeczywistego, przy czym składniki tych wektorów to strumień objętości powietrza prognozowany i obliczony na podstawie pomiarów prędkości przez anemometry systemu monitoringu rozmieszczone w wybranych wyrobiskach kopalni. Następnie opracowano algorytm 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 przedstawiono na wykresach i zestawieniach tabelarycznych. W podsumowaniu przedstawiono wnioski potwierdzające trudności prowadzenia badań walidacyjnych wynikające zarówno z powodu złożonego modelu matematycznego opisującego przepływ powietrza oraz trudności z uzyskaniem dobrej jakości danych pomiarowych za pomocą czujników systemu monitoringu wyrobisk kopalni.

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

1. Wstęp

Prognozowanie stanu wentylacji za pomocą komputerowych programów symulacyjnych ma coraz szersze zastosowanie w kopalniach głębinowych. Oczywiście jest, że wiarygodność prognozy jest ściśle związana z wiarygodnością modelu sieci wentylacyjnej kopalni, zastosowanego w programie symulacyjnym. Dotyczy to zarówno struktury sieci jak i jej parametrów, zapisanych jako baza danych dla modelu. Stąd wynika konieczność weryfikacji wyników otrzymanych na drodze obliczeń numerycznych w oparciu u dany

model matematyczny przez porównanie go z wynikami otrzymanymi z pomiarów, czyli przeprowadzenie walidacji modelu. Obecnie jest to możliwe dzięki systemom monitoringu wentylacji, powszechnie stosowanych w kopalniach. Stan wentylacji jest kontrolowany przez system czujników gazometrii automatycznej, które zainstalowane są w prądzie powietrza obiegowego, oraz w miejscach zagrożenia metanowego zlokalizowanych w zrobach, jak również na styku zrobów ze ścianą, szczególnie na wylocie ze ściany. Wobec takiej sytuacji należy dążyć do rozbudowy systemów gazometrycznych o możliwość monitorowania obszaru zrobów w zakresie skojarzonego zagrożenia metanowo-pożarowego (Wasilewski, Cimr, Wach, 2010).

Wykonane w latach 2000-2011 badania walidacyjne prowadzone były w oparciu o jakościowe kryteria obserwowanych przebiegów czasowych wyników symulacji. Pierwsze prace w zakresie walidacji, w których wykorzystano dane systemu monitoringu kopalni prowadzono dla rejonu dwóch różnych ścian w kopalni Budryk, a w szczególności dla ściany B-5 w roku 2006 (Wasilewski, Bojarski, Kurpas, 2007) i ściany B-6 w roku 2008 (Dziurzyński, Krach, Pałka, Wasilewski, 2008). Zdobyte doświadczenie pozwoliło na zaplanowanie długookresowego eksperymentu przeprowadzonego w ścianie 841A w kopalni Bielszowice, gdzie rozpatrywano pracę kombajnu w dwóch cyklach, z urabianiem w jedną stronę zgodną z kierunkiem przepływu powietrza, z postojami przenośników w czasie przerw w pracy kombajnu. W ramach tych badań przeprowadzono modyfikację modelu matematycznego, co pozwoliło na odtworzenie stanu wentylacji w ścianie i wyznaczenie rozkładu metanu wzdłuż ściany po dłuższym postoju kombajnu, a przed rozpoczęciem urabiania kombajnu (Dziurzyński, Krach, Pałka, Wasilewski, 2009).

Interesującym kolejnym etapem badań było wykorzystanie modelu numerycznego utworzonego na podstawie pomiarów wentylacyjnych przeprowadzonych w kopalni po zdarzeniu wybuchu metanu we wrześniu 2009 roku w ścianie 5 w pokładzie 409 w KWK Śląsk i opracowanie bazy danych systemu programów Inżyniera Wentylacji *VentGraph*. Następnie korzystając z nowych opcji programu *VentZroby* utworzono model numeryczny kopalni z dołączonym obszarem zrobów ściany 5 w pokładzie 409 i podjęto próbę odtworzenia stanu przewietrzania przed zdarzeniem. Takie badania pozwalają nie tylko na samą ocenę zjawisk przepływowych, a szczególnie na pokazanie zmian stężenia metanu, wywołanych np. wyłączeniem wentylatora głównego przewietrzania (Dziurzyński, Krach, Pałka, Wasilewski, 2011). Uzyskanie zwalidowanego modelu numerycznego umożliwia wiarygodną wielowariantową symulację zdarzeń, która pozwala na ich właściwą interpretację, prowadzi do wyciągnięcia praktycznych wniosków i zrozumienia przyczyn katastroficznych zdarzeń.

Rozważany problem walidacji programów symulacyjnych wykorzystuje miarę odległości danych z prognozy i danych z monitoringu w postaci sumy kwadratów różnic wartości zmierzonych i prognozowanych z wagami. Miara taka jest funkcją celu minimalizowaną wybraną metodą optymalizacji numerycznej. Metody analityczne optymalizacji już dawno znalazły zastosowanie w dziedzinie układów sterowania, w związku z czym istnieje bogata literatura, poświęcona tym zagadnieniom. Nowsze są metody optymalizacji numerycznej, które umożliwiają optymalizację wybranego kryterium w wielowymiarowych obiektach, stosując metody iteracyjne. Metody optymalizacji statycznej i dynamicznej mogą mieć zastosowanie do minimalizacji funkcji celu, określonej dla obliczonych prognozowanych przebiegów rozpatrywanych wielkości wentylacyjnych. Miara odległości szeregów czasowych dobrze nadaje się do zastosowania w numerycznych metodach minimalizacji funkcji celu, co pozwoli na pełną automatyzację procesów weryfikacji parametrów modelu matematycznego, zawartych w bazie danych programu symulacji przewietrzania kopalni.

2. Model matematyczny przewietrzania kopalni

Model matematyczny przewietrzania kopalni stosowany w programach symulacyjnych procesu przewietrzania w stanach normalnych i awaryjnych *VentGraph* opracowanych w IMG PAN (Dziurzyński, 2002) składa się z następujących elementów:

- układu stacjonarnych równań oczkowych sieci dla obliczania strumieni masy przepływu mieszaniny powietrza i gazów domieszkowych (głównie metanu i gazów pożarowych) w bocznicach sieci i zrobach,
- układu równań węzłowych dla obliczania udziałów masowych gazów domieszkowych (tj. metan, azot, tlen, dwutlenek węgla i tlenek węgla) w strumieniach powietrza wypływających z węzła,
- równań opisujących propagację gazów domieszkowych w bocznicach i zrobach,
- równań opisujących źródła dopływu gazów domieszkowych w sieci.

Przyjmując, że sieć wentylacyjna jest reprezentowana przez spójny graf skierowany o I węzłach i J krawędziach, które w wentylacji kopalń nazywa się bocznicami, można napisać układ równań obwodów podstawowych (oczkowych) w zapisie macierzowym (Dziurzyński et al. 2005)

$$\beta \cdot \Delta p = 0 \quad (1)$$

gdzie:

β – macierz obwodów podstawowych (incydencji oczkowo-bocznicowej) o wymiarze $J-I+1 \times J$,
 Δp – macierz kolumnowa różnic ciśnień statycznych na początku i na końcu bocznicy.

Elementy macierzy Δp dla przepływu w wyrobiskach korytarzowych są równe:

$$\Delta p_j = R_{Mj} |Q_{Mj}| Q_{Mj} + \Delta z_i g \rho_{srj} - h_{wj} \quad (2)$$

gdzie:

R_{Mj} – opór aerodynamiczny dla strumienia masy bocznicy nr j ,
 Q_{Mj} – strumień masy powietrza w bocznicy,
 h_{wj} – depresja mechaniczna w bocznicy,
 Δz_j – różnica kot niwelacyjnych początku i końca bocznicy,
 ρ_{srj} – średnia gęstość powietrza w bocznicy,
 g – przyspieszenie ziemskie.

Wektor strumieni bocznicowych wyraża się następująco:

$$Q_M = \beta^T \cdot Q_{M0} \quad (3)$$

gdzie Q_{M0} – wektor strumieni oczkowych.

Powyższe związki tworzą $J-I+1$ niezależnych nieliniowych równań z niewiadomymi strumieniami oczkowymi. W programie symulacji równania te rozwiązywane są metodą Crossa. W wyniku otrzymuje się wektor podstawowych (oczkowych, bazowych) strumieni masy powietrza Q_{M0} . Strumienie objętości powietrza w bocznicach otrzymuje się z następującego iloczynu, gdzie wektor bocznicowych strumieni masy dany jest związkiem (3).

$$Q_v = \rho^{-1} \cdot Q_M \quad (4)$$

gdzie ρ – macierz diagonalna gęstości powietrza w bocznicach.

Określając macierz diagonalną powierzchni przekrojów bocznic A łatwo można obliczyć wektor wartości średnich prędkości powietrza w bocznicach:

$$v = A^{-1} \cdot Q_v \quad (5)$$

Prędkości te umożliwiają symulację przemieszczania się w bocznicach sieci mieszaniny powietrza i gazów wypływającej z węzłów sieci, przy czym udziały masowe składników tej mieszaniny oblicza się z bilansów masy dla węzłów. Udział masy składnika n w strumieniach wypływających z węzła nr i jest:

$$C_{Mni} = \frac{0,5 \sum_{j=1}^J (|a_{i,j} Q_{Mj}| - a_{i,j} Q_{Mj}) C_{Mnj} + C_{Mz ni} Q_{Mz ni}}{0,5 \sum_{j=1}^J (|a_{i,j} Q_{Mj}| - a_{i,j} Q_{Mj}) + Q_{Mz ni}} \quad (6)$$

gdzie

Q_{Mj} – strumień masy powietrza w bocznicy j ,
 $C_{Mn,j}$ – udział masowy składnika n mieszaniny w strumieniu płynącym boczną j ,
 $Q_{Mz i}$ – strumień masy mieszaniny dopływający bezpośrednio do węzła i ,
 $C_{Mz ni}$ – udział masowy składnika n mieszaniny w strumieniu dopływającym bezpośrednio do węzła i ,
 $a_{i,j}$ – element macierzy incydencji węzłowo-bocznicowej, gdzie $a_{i,j} = 1$ dla strumienia w bocznicy nr j wypływającego z węzła nr i .

Powyższy związek można zapisać w postaci macierzowej

$$\mathbf{b} \cdot \mathbf{C}_M = \mathbf{Q}_{Mz} \quad (7)$$

gdzie

- \mathbf{C}_M – macierz kolumnowa udziałów masowych C_{Mni} n -tego składnika powietrza kopalnianego w węźle nr i ,
- \mathbf{Q}_{Mz} – macierz kolumnowa strumieni masy Q_{Mzi} n -tego składnika gazu dopływającego do węzła nr i z źródła zewnętrznego,
- \mathbf{b} – macierz kwadratowa współczynników $b_{i,n}$ o wymiarze $I \times I$, gdzie I jest liczbą węzłów sieci wentylacyjnej,

Strumień masy Q_{Mzi} n -tego składnika powietrza dopływającego do węzła nr i z źródła zewnętrznego jest równy

$$Q_{Mzi} = Q_{Mzi} C_{Mzi} \quad (8)$$

gdzie

- Q_{Mzi} – strumień masy gazu dopływający do węzła nr i z źródła zewnętrznego,
- C_{mzni} – udział masowy n -tego składnika w tym strumieniu.

Elementy macierzy \mathbf{b} są równe:

$$b_{i,n} = -0,5 \sum_{j=1}^J \left(|\alpha_{i,j} Q_{Mj}| - \alpha_{i,j} Q_{Mi,j} \right) |\alpha_{n,j}| \quad \text{gdy } i \neq n$$

$$b_{i,n} = 0,5 \sum_{j=1}^J \left(|\alpha_{i,j} Q_{Mj}| + \alpha_{i,j} Q_{Mi,j} \right) + Q_{Mzi} \quad \text{gdy } i = n \quad (9)$$

Udziały masowe n -tego składnika powietrza w bocznicy nr j można wyznaczyć z równania macierzowego

$$\mathbf{C}_{Mb} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{C}_M \quad (10)$$

gdzie

- \mathbf{C}_{Mb} – macierz kolumnowa udziałów masowych C_{Mbnj} n -tego składnika powietrza w bocznicy nr j ,
- \mathbf{a} – macierz współczynników $a_{i,j}$ o wymiarze $J \times I$.

Współczynniki macierzy \mathbf{a} są równe

$$a_{j,i} = 0,5 \left[|\alpha_{i,j}| + \alpha_{i,j} \text{sign}(Q_j) \right] \quad (11)$$

3. Estymacja stanu sieci wentylacyjnej kopalni

Procedura estymacji modelu matematycznego sieci wentylacyjnej do rzeczywistego stanu sieci wymaga określenia miary, która pozwala ocenić stopień zgodności wielkości obliczonych z wielkościami rzeczywistymi. Miarą taką może być unormowany kwadrat odległości wektorów stanu prognozowanego i rzeczywistego, przy czym składniki tych wektorów zależą od tego, jakich wielkości dotyczy prognoza. Jeżeli prognozowany jest rozptył powietrza w sieci wentylacyjnej w stanie ustalonym, to miarą będzie

$$S = \sum_{n=1}^N w_n (q_n - q_{pn})^2 \quad (12)$$

gdzie

- w_n – współczynnik wagi,
- q_n – obliczone strumienie objętości powietrza w tych bocznicach,
- q_{pn} – zmierzone i przefiltrowane wartości strumieni objętości powietrza w tych bocznicach.

Jeżeli oprócz rozplywu powietrza prognoza dotyczy rozkladu stężeń metanu, to miara może mieć postać

$$S = \sum_{n=1}^N w_n (q_n - q_{pn})^2 + \sum_{m=1}^M w_m (C_m - C_{pm})^2 \quad (13)$$

W przypadku, gdy prognoza dotyczy stanu nieustalonego wentylacji miara musi obejmować wybrany okres czasu T . W tym przypadku może to być

$$S = \frac{1}{T} \left[\int_0^T \sum_{n=1}^N w_n (q_n - q_{pn})^2 dt + \int_0^T \sum_{m=1}^M w_m (C_m - C_{pm})^2 dt \right] \quad (14)$$

Wyniki pomiarów najczęściej są dane w postaci szeregów czasowych, stąd, obliczanie całek w (14) sprowadza się do sumowania

$$\Delta t \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N w_n (q_{n,k} - q_{pn,k})^2 \quad (15)$$

Powyższa zależność jest słuszna jedynie, gdy krok czasowy obliczeń numerycznych w programie symulacji jest stały i jest wielokrotnością lub podwielokrotnością okresu powtarzania pomiaru (okresu próbkowania). W innym przypadku numeryczne obliczanie całek w (14) wymaga interpolacji wartości zmierzonych między punktami pomiarowymi.

Procedura estymacji modelu matematycznego stosowanego w programie symulacji przewietrzania kopalni ma doprowadzić do zgodności prognozy otrzymanej w wyniku symulacji zadanego stanu procesu wentylacyjnego z wynikami pomiarów zarejestrowanymi przez system monitoringu. Do tego celu służy porównanie wyników otrzymanych z symulacji z wynikami pomiarów kopalnianych, czyli obliczenie miary S . 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. Zadanie to nazywa się estymacją stanu sieci, a poszukiwane parametry są zmiennymi stanu. Zagadnieniem tym zajmował się J. Tracz, który w sprawozdaniu z prac statutowych IMG PAN (Dziurzyński W., Pałka T., Tracz J., 1995) rozpatrywał problemy obserwowalności sieci, analizy błędów i optymalizacji systemu pomiarowego. Podane w wymienionej pracy zależności odnoszą się do stanu ustalonego. W teorii istnieje określenie identyfikacji procesu przy niepełnej znajomości zmiennych stanu, a w praktyce regułą jest nieobserwowalność pełnego stanu sieci z powodu zbyt małej liczby czujników. Można jednak dla danego zbioru wyników pomiarów wyróżnić obserwowalne zmienne stanu.

Estymacja stanu obiektu opiera się na minimalizacji funkcji celu danej zależnością

$$S = \sum_{n=1}^N w_n [y_{pn} - f_n(x_1, x_2, \dots, x_M)]^2 \quad (16)$$

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.

Minimalizację funkcji celu można uzyskać metodą gradientu (najszybszego spadku) z ograniczeniami lub inną, wybraną spośród wielu znanych metod optymalizacji numerycznej (Gościński i inni 1974). W metodzie najszybszego spadku oblicza się gradient funkcji celu

$$G_m = -2 \sum_{n=1}^N w_n \frac{\partial f_n}{\partial x_m} [y_{pn} - f_n(x_1, x_2, \dots, x_M)] \quad (17)$$

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

$$x_{Nm} = x_m - \beta G_m \quad \text{dla} \quad m = 1 \dots M \quad (18)$$

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

Pochodne $\frac{df_n}{dx_m}$ w wzorze (17) 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 *VentZroby*, przyjęto dochodzenie do rozwiązania w dwóch etapach. W pierwszym etapie program optymalizacji numerycznej zmienia opory bocznic sieci w bazie danych programu *VentZroby* tak, aby obliczone 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 ten system. W drugim etapie 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 te metanomierze. W tym celu program optymalizacji w pierwszym etapie minimalizuje funkcję celu w postaci

$$S_R = \sum_{i=1}^I (Q_{Vi} - Q_{VMi})^2 \quad (19)$$

gdzie

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

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

$$R_{Nj} = R_j - \beta G_j \quad \text{dla} \quad j = 1 \dots J \quad (20)$$

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

$$G_j = 2 \sum_{i=1}^I \frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} (Q_{Vi} - Q_{VMi}) \quad (21)$$

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

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

$$\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} = 2a_{Ri,j} R_j + b_{Ri,j} \quad (22)$$

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

$$Q_{Vi} = a_{Ri,j} R_j^2 + b_{Ri,j} R_j + C_{Ri,j} \quad (23)$$

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

$$Q_{Vi1} = f(R_{j1}) \quad Q_{Vi2} = f(R_{j2}) \quad Q_{Vi3} = f(R_{j3}) \quad (24)$$

Dla wartości oporów bocznicy nr j wyrażonych jak niżej

$$R_{j1} = R_j, \quad R_{j2} = R_j + \Delta R, \quad R_{j3} = R_j - \Delta R \quad (25)$$

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

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

Współczynnik wrażliwości obliczony dla tych wartości oporu jest równy

$$\frac{\partial Q_{Vi}}{\partial R_j} = \frac{Q_{Vi2} - Q_{Vi3}}{2u_R R_j} \quad (27)$$

W drugim etapie program optymalizacji minimalizuje funkcję celu w postaci

$$S_C = \sum_{n=1}^N (C_{Vn} - C_{VMn})^2 \quad (28)$$

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.

Kolejne wartości udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach C_{Vn} program *VentZroby* oblicza dla kolejnych wartości strumieni objętości metanu dopływających z źródeł zewnętrznych

$$q_{Nm} = q_m - \gamma H_m \quad (29)$$

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

$$H_m = 2 \sum_{n=1}^N \frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} (C_{Vn} - C_{VMn}) \quad (30)$$

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

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} = 2a_{Cn,m} q_m + b_{Cn,m} \quad (31)$$

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

$$C_{Vn} = a_{Cn,m} q_m^2 + b_{Cn,m} q_m + c_{Cn,m} \quad (32)$$

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

$$Q_{Vn1} = f(q_{m1}) \quad Q_{Vn2} = f(q_{m2}) \quad Q_{Vn3} = f(q_{m3}) \quad (33)$$

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

$$q_{m1} = q_m, \quad q_{m2} = q_m + \Delta q, \quad q_{m3} = q_m - \Delta q \quad (34)$$

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

$$q_{m2} = (1 + u_C)q_m, \quad q_{m3} = (1 - u_C)q_m \quad (35)$$

Współczynnik wrażliwości obliczony dla tych wartości oporu jest równy

$$\frac{\partial C_{Vn}}{\partial q_m} = \frac{C_{Vn2} - C_{Vn3}}{2u_C q_m} \quad (36)$$

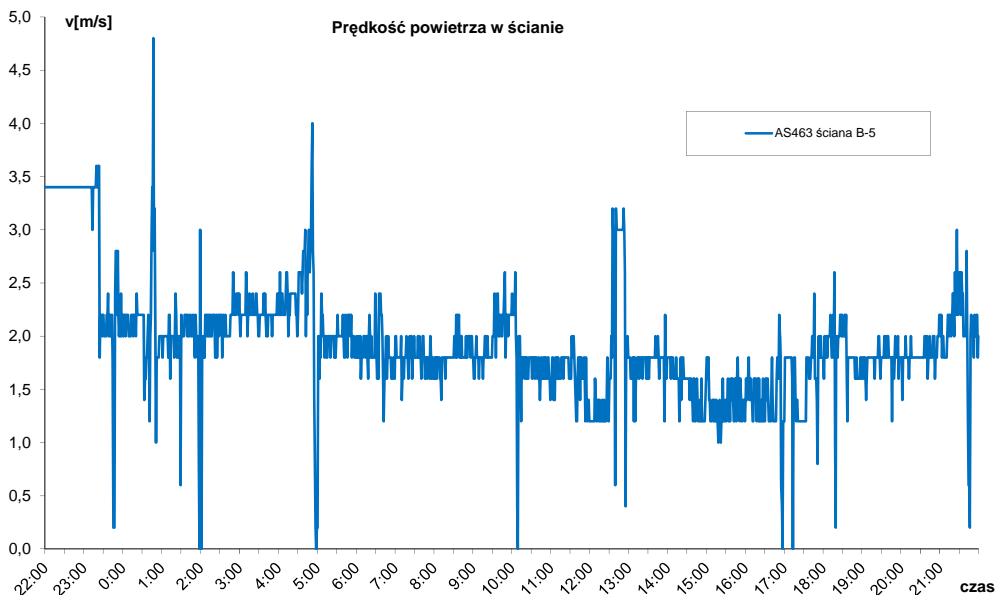
Dla estymacji stanu rozplywu powietrza w bocznicach sieci wentylacyjnej na podstawie funkcji celu konieczna jest znajomość wartości strumieni objętości powietrza wyznaczonych w programie symulacji i obliczonych na podstawie prędkości powietrza zarejestrowanych przez czujniki systemu monitoringu wentylacji 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

$$Q_V = cAv \quad (37)$$

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 (Rys. 1), przy czym w tych przebiegach (sygnałach) można wyróżnić dwie składowe zakłóceń: szybkozmienną i wolnozmienną.



Rys. 1. Przykładowy przebieg prędkości powietrza przed filtracją

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 filtra-

cji cyfrowej w celu eliminacji tych obu zakłóceń i uzyskania składowej użytecznej 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 odnosi się do stanu ustalonego, to z wyznaczonych na podstawie danych rejestrowanych w systemie monitoringu przebiegów strumieni objętości powietrza w danym przedziale czasu należy wyznaczyć stałe wartości strumieni. Tu przyjęto, że wartościami strumieni objętości powietrza przyjętymi jako dane wejściowe do procesu estymacji będą wartości wzięte z odcinka czasu, dla którego funkcja celu wyrażona wzorem (19) będzie miała najmniejszą wartość. Jednak, biorąc pod uwagę losowy charakter zmian wartości strumieni objętości powietrza w bocznicach sieci wentylacyjnej, należy rozważyć, czy nie bardziej właściwe byłoby zastosowanie średnich wartości strumieni objętości powietrza zarejestrowanych w danym przedziale czasu.

Podobne uwarunkowania jak dla estymacji rozplywu powietrza w sieci dotyczą estymacji stanu udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach sieci. Jednak dla sprawdzenia działania algorytmu programu optymalizacji na przykładzie obliczeniowym ograniczono się do procedury estymacji stanu rozplywu powietrza w bocznicach sieci wentylacyjnej.

4. Algorytm estymacji zastosowany w programie *VentZroby*

Estymację stanu sieci przeprowadzono w pierwszym etapie tylko dla rozplywu powietrza w bocznicach sieci stosując minimalizację funkcji celu metodą gradientu (najszybszego spadku). Algorytm obliczeń numerycznych wykorzystywany w tym celu w programie *VentZroby* podano poniżej.

1. Obliczyć strumień objętości powietrza w bocznicach dla danego modelu sieci wentylacyjnej kopalni.
2. W bazie danych modelu opisujących strukturę sieci wentylacyjnej kopalni wybrać bocznicę, w której znajdują się czujniki prędkości przepływu powietrza systemu monitoringu. Numery wybranych bocznic: $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$.
3. Obliczyć wszystkie kolumny tablicy współczynników wrażliwości strumieni objętości powietrza $\frac{dQ_i}{dR_j}$.
4. W tablicy współczynników wrażliwości wybrać wiersze $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$

5. Wybrać największą wartość modułu współczynnika wrażliwości $\max \left(\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right| \right)$ w każdym wierszu $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$ tablicy wrażliwości i unormować wszystkie współczynniki wiersza tablicy (podzielenie

modułów współczynników wrażliwości $\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right|$ przez $\max \left(\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right| \right)$ danego wiersza: $\frac{\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right|}{\max \left(\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right| \right)}$)

6. Wybrać w wierszach $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$ tablicy współczynników wrażliwości $\frac{dQ_i}{dR_j}$ współczynniki spełniające warunek

$\frac{\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right|}{\max \left(\left| \frac{dQ_i}{dR_j} \right| \right)} > k$ ($k < 1$) czyli dla każdego i_n ze zbioru $(i_1, i_2, i_3, \dots, i_N)$ otrzymuje się

numery bocznic $j_1, j_2, j_3, \dots, j_M$ (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 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$. 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.

7. Obliczyć przebieg funkcji celu dla wybranego przedziału przebiegów strumieni objętości powietrza zarejestrowanych przez system monitoringu w bocznicach nr $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$ stosując wzór (19) i z tego przedziału wybrać fragment, gdzie funkcja celu jest najmniejsza $S_0 = \min(S)$. Do dalszych obliczeń jako wartości strumieni objętości powietrza otrzymane z systemu monitoringu przyjąć wartości z wybranego fragmentu przedziału zarejestrowanych przebiegów strumieni objętości powietrza.

8. Obliczyć funkcję celu $S = \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{Mi})^2$, gdzie Q_{Mi} jest to strumień objętości powietrza w boczniczy i z monitoringu, wybrany w punkcie 7, a Q_i jest to strumień objętości powietrza w tej boczniczy otrzymany w wyniku obliczeń w programie *VentZroby*.
9. Obliczyć gradient funkcji celu $\frac{dS}{dR_j} = 2 \sum_{i=1}^N \frac{dQ_i}{dR_j} (Q_i - Q_{Mi})$ dla strumieni objętości powietrza w bocznicach nr $i_1, i_2, i_3, \dots, i_N$ przy zmianach oporu bocznic nr $j_1, j_2, j_3, \dots, j_M$.
10. Obliczyć współczynnik β : $\beta = \frac{r}{\max \left(\left| \frac{dS}{dR_j} \right| \right)}$ dla $j = j_1, j_2, j_3, \dots, j_M$, gdzie $r = \frac{\Delta R}{R}$. Tu przyjęto $r = 0,1$.
11. Obliczyć współczynnik α :
1. wartość początkowa $\alpha = 0$,
 2. dalej $\alpha = a |S_0 - S_1|$
gdzie
 S_0 – wartość początkowa funkcji celu obliczona w punkcie 7,
 S_1 – wartość funkcji celu obliczona w pierwszym cyklu,
 a – stała, tu przyjęto $a = 0,1$.
12. Obliczyć nowe wartości R_j : $R_j = R_j - \beta \frac{dS}{dR_j}$.
13. Obliczyć nowy rozpływ powietrza w sieci w programie *VentZroby*.
14. Obliczyć nową wartość funkcji celu S_N .
15. Sprawdzić warunek:
 jeżeli $|S - S_N| < \alpha$ to koniec estymacji,
 jeżeli $S_N < S$ to do punktu 12,
 jeżeli $S_N > S$ to do punktu 9 (pomijając punkty 10 i 11 po pierwszym cyklu obliczeniowym).

5. Zastosowanie procedur optymalizacji dla celów walidacji modelu – przykład

Jako przykład testującą przedstawioną koncepcję automatycznej estymacji modelu matematycznego rozptyłu powietrza w sieci wentylacyjnej wybrano rejon ściany 5 pokład 409, gdzie prowadzona była eksploatacja, zroby zlikwidowanej ściany 3, wyrobiska doprowadzające i odprowadzające powietrze z rejonu, jak również wyrobiska następnej uruchamianej ściany 4.

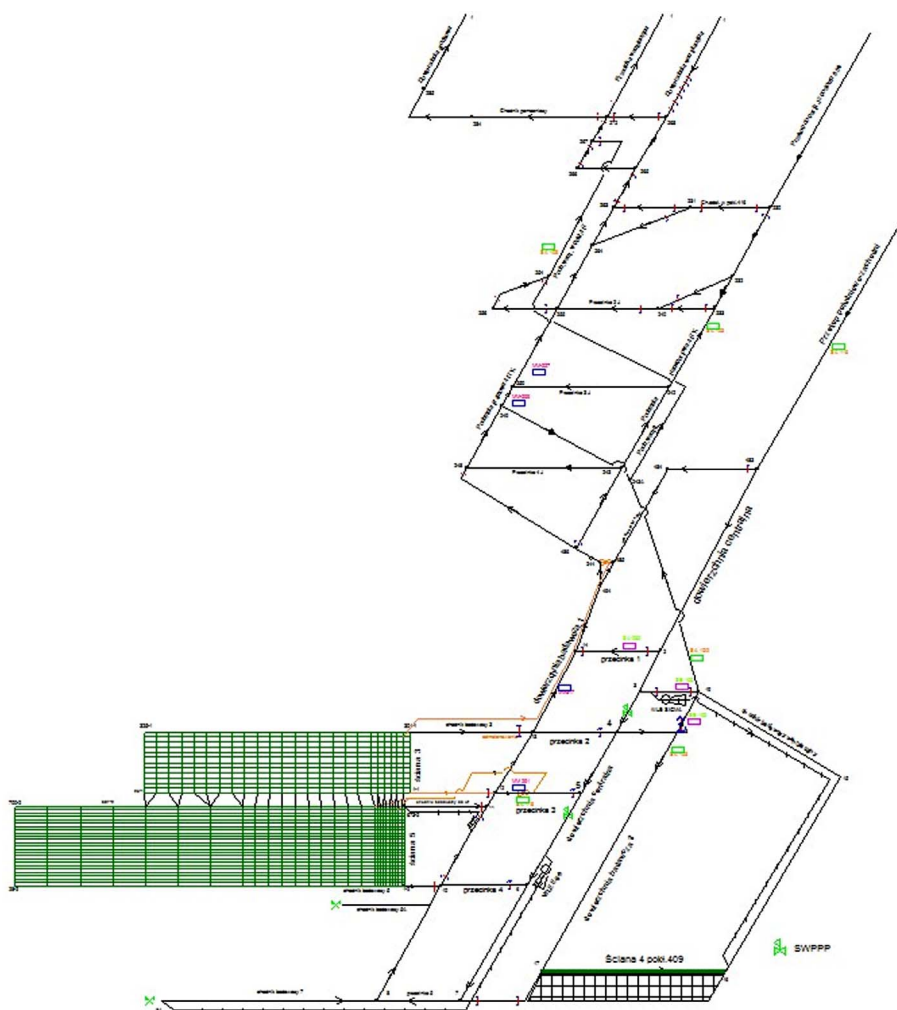
Rozpatrywany będzie okres po zdarzeniu wybuchu metanu w ścianie 5 we wrześniu 2009 roku, a szczególnie dzień 05.12.2009, podczas którego zespół pracowników IMG PAN wykonał w dowierzchni centralnej specjalistyczne pomiary strumienia objętości powietrza w oparciu o wielopunktowy system pomiarowy (Krawczyk J., Kruczkowski J. 2009) oraz pomiary zmian ciśnienia w bezpośrednim rejonie otamowanej ściany 5. Uzyskane dane pomiarowe są też wykorzystane do badań walidacyjnych. Dane z systemu gazometrii automatycznej z dnia pomiarów 05.12.2009 przedstawiono na wykresach zmian prędkości; rys. 5a-f (linia ciągła ze znacznikiem) oraz zmian stężenia metanu na rys. 6a-d, a miejsce lokalizacji czujników anemometrycznych i metanomierzy przedstawiono w Tabeli 1.

Na rysunku 2 pokazano rysunek graficzny opracowanego modelu numerycznego 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.

Dane charakteryzujące przepływ mieszaniny powietrza i metanu dla wyrobisk wyznaczono na podstawie danych pomiarowych wykonanych w sieci wyrobisk kopalni po zdarzeniu w roku 2010. 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 m³/min, a do zrobów ściany 5 dopływ wynosi 12 m³/min.

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

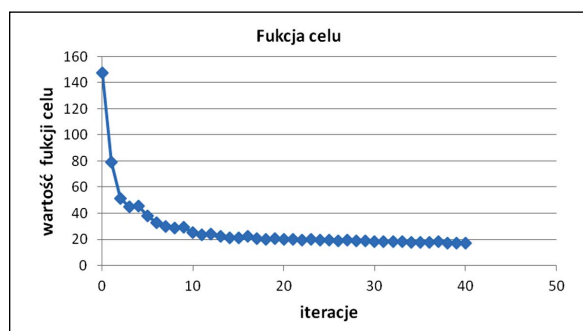
Lp.	Numer linii czujnika	Numer czujnika	Jednostka	Typ	Lokalizacja
1	SA:102	V102	[m/s]	SAS-2	Przekop do pokładu 409 – 50 m na płn. od chodnika wentylacyjnego badawczego
2	SA:103	V103	[m/s]	SAS-2	Pochylnia transportowa 417K , do 50 m od przecinki 2/502J
3	SA:105	V105	[m/s]	SAS-2	Dowierzchnia badawcza 3/409, 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 – 5 m 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



Rys. 2. Schemat przestrzenny otamowanego rejonu ściany 3, 4 i 5 pokł. 409, model numeryczny

5.1. Estymacja prognozy rozplywu powietrza – obliczenia

W prezentowanych dalej rozważaniach dla sprawdzenia poprawności algorytmu estymacji prognozy rozplywu powietrza przyjęto, że miara odległości S wektorów strumieni objętości powietrza w bocznicach z symulacji i z monitoringu dana wzorem (19) wyznaczona będzie na podstawie obliczeń strumienia objętości powietrza wykonanych przez program *VentZroby* i wartości strumieni objętości powietrza obliczonych przez procedurę optymalizacji z przebiegów zarejestrowanych przez system monitoringu w bocznicach, w których znajdują się czujniki prędkości systemu monitoringu. Przyjmując pole przekroju wyrobiska za wielkość stałą, końcowy wynik porównania zostanie pokazany na Rys. 5 dla parametru, jakim jest prędkość przepływu powietrza. Jako podstawę do obliczeń miary odległości S i optymalizacji funkcji celu (19) przyjęto przebiegi czasowe zmian prędkości zarejestrowane przez sześć czujników anemometrycznych (Tabela 1). Przebieg prędkości przepływu powietrza w wybranym okresie czasowym pokazano na rysunkach od 5a do 5f (linia ciągła ze znacznikiem).



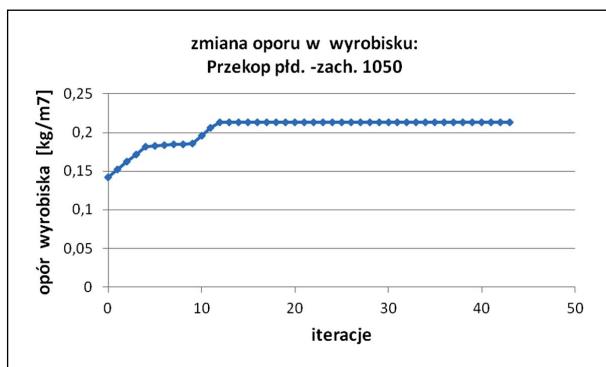
Rys. 3. Przebieg funkcji celu dla kolejnych iteracji

W pierwszym etapie działania algorytmu optymalizacji prowadzącym do estymacji prognozy rozplywu powietrza otrzymanej z modelu matematycznego stosowanego w programie *VentZroby* porównano wyniki otrzymane z symulacji z wynikami pomiarów kopalnianych. Procedura estymacji w programie komputerowym wybiera z przebiegów strumienia objętości powietrza w bocznicach zarejestrowanych przez system monitoringu w danym przedziale czasu taki fragment tego odcinka, w którym miara odległości wektorów strumieni objętości powietrza w bocznicach z symulacji i z monitoringu dana wzorem (19) osiąga minimalną wartość. Wartości strumieni objętości powietrza zarejestrowane przez system monitoringu w tym fragmencie przedziale czasu zostają przyjęte jako wielkości wejściowe do obliczania miary odległości (19) jako funkcji celu w procesie estymacji. W przykładzie obliczeniowym program wybrał 57-mą minutę godziny 10-tej na osi czasu przebiegów strumienia objętości powietrza pokazanych na Rys. 5 a-f.

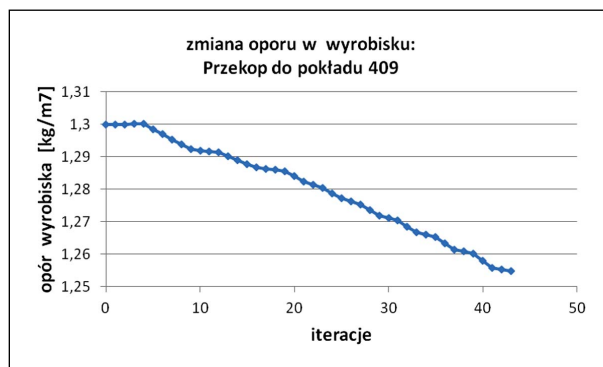
Ponieważ wartości obliczone w wyniku symulacji zależą od przyjętych parametrów modelu, to aby miara S wskazywała na wiarygodność modelu, parametry tego modelu muszą zostać zmodyfikowane tak, aby miara S jako funkcja celu w wybranej procedurze optymalizacji została zminimalizowana. Do obliczeń wybrano opór aerodynamiczny bocznic rozważanego modelu numerycznego jako parametr modelu. Przeprowadzono obliczenia w programie *VentZroby* uzupełnionym o nowe procedury optymalizacyjne, a wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach. Na rysunku 3 pokazano przebieg zmian funkcji celu, który wskazuje na zbieżność procesu optymalizacji dla przyjętych warunków obliczeń.

Na kolejnym rysunku 4, pokazano zmiany oporów aerodynamicznych wybranych bocznic, w których zlokalizowano czujniki prędkości systemu gazometrycznego.

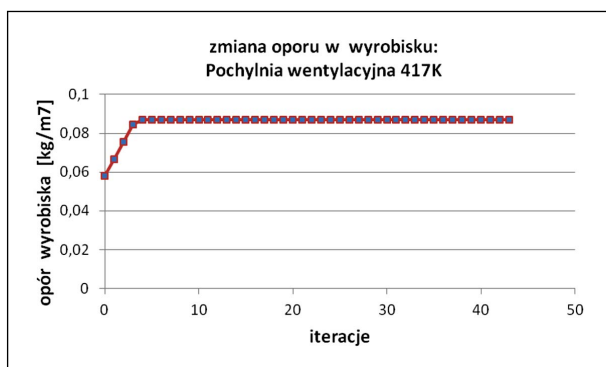
W wyniku działania procedury estymacji parametrów modelu, a w rozpatrywanym przypadku jest nim opór aerodynamiczny, zmianie uległ obliczony przez program komputerowy *VentZroby* rozplyw powietrza, a tym samym prędkość przepływu powietrza. Wynik obliczeń pokazano na kolejnych rysunkach od 5a do 5f. Można zauważyć lepsze dopasowanie prędkości do wartości mierzonych przez czujniki anemometryczne. Analiza wyników wskazuje, że w innych bocznicach sieci wyrobisk algorytm estymacji również dokonał zmian w oporach aerodynamicznych wyrobisk. Taka zmiana parametrów modelu powoduje zmiany w stężeniu metanu, który jest obliczany przez program komputerowy *VentZroby*. Na kolejnych rysunkach 6a do 6d pokazano przebiegi stężenia metanu rejestrowane przez czujniki metanu systemu gazometrii automatycznej



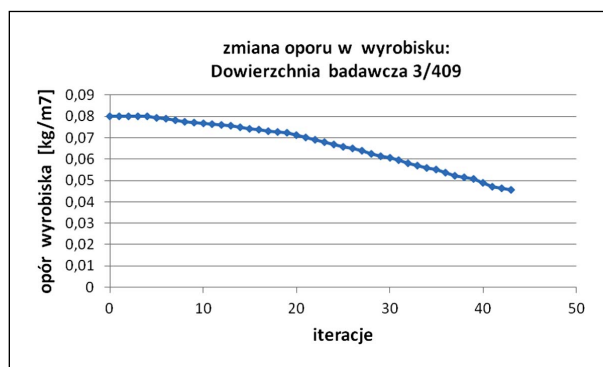
Rys. 4a. Miejsce lokalizacji czujnika V116



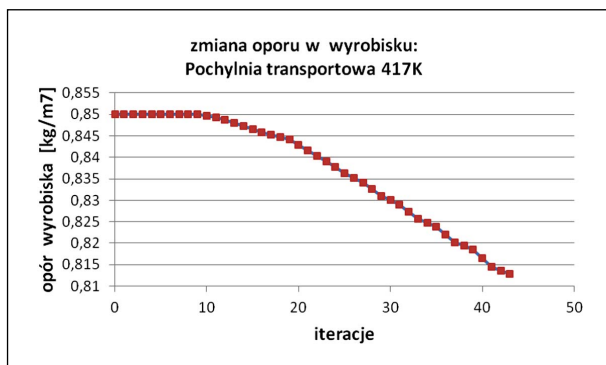
Rys. 4b. Miejsce lokalizacji czujnika V103



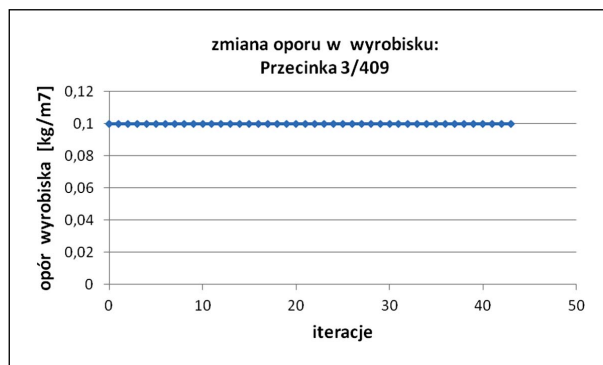
Rys. 4c. Miejsce lokalizacji czujnika V108



Rys. 4d. Miejsce lokalizacji czujnika V105



Rys. 4e. Miejsce lokalizacji czujnika V102



Rys. 4f. Miejsce lokalizacji czujnika V118

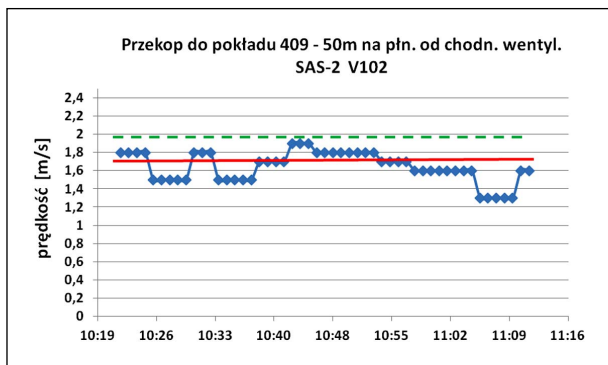
Rys. 4. Zmiany oporu aerodynamicznego podczas iteracji w wybranych bocznicach rejonu

(linia ciągła ze znacznikiem) oraz linia przerywana stan w rozplywie przed estymacją, a linia ciągła obrazuje wartość stężenia metanu po estymacji. Na obserwowanych czujnikach widzimy, że poziom obliczonego stężenia metanu jest wyższy, co wynika z zmniejszonego strumienia objętości przepływu powietrza, w następstwie zmian oporów.

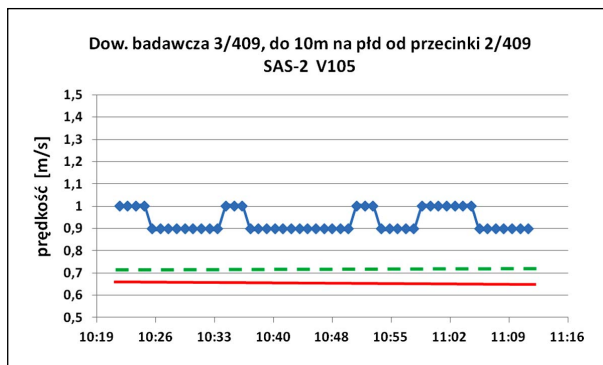
Interesującym jest zestawienie obliczonych wartości strumienia objętości powietrza w dowierzchni centralnej i porównanie z strumieniem objętości powietrza zmierzonym przez system wielopunktowego pomiaru prędkości przepływu w wyrobiskach górniczych (SWPPP), umożliwiającą wykonywanie i rejestrację pomiarów w wybranych miejscach przekroju wyrobiska (Krach, Krawczyk, Kruczkowski. Pałka. 2007). W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń ilości powietrza przed i po wykonanej estymacji z wynikami pomiarów systemem SWPPP w trzech miejscach dowierzchni (Krawczyk i Kruczkowski, 2009).

Tab. 2

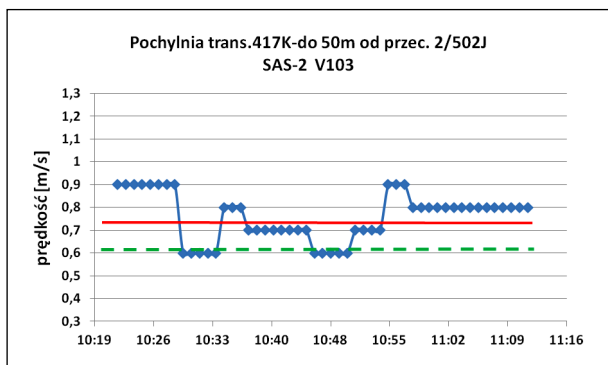
Wyrobisko	Węzły Wlot - wylot	Strumień objętości [m ³ /min]		
		System SWPPP	Przed estymacją	Po estymacji
Dowierzchnia przed przecinką 1	483 - 2	3519	3884	3376
Dowierzchnia przed przecinką 2	3 - 4	2377	2982	2502Pm ci [m ³ /min]
Dowierzchnia za przecinką 3	5 - 6	1744	1706	1399



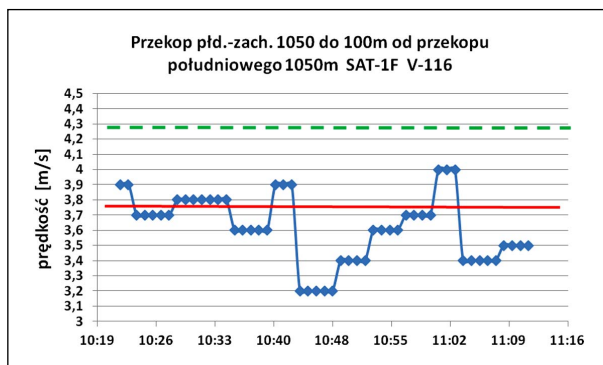
Rys. 5a. Czujnik V102



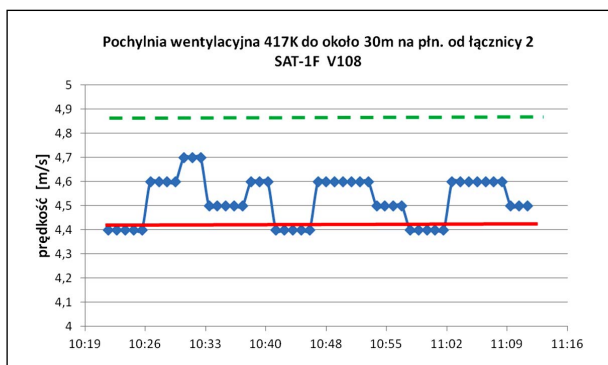
Rys. 5b. Czujnik V105



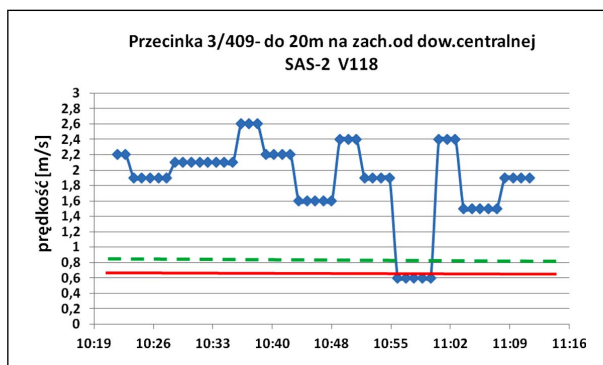
Rys. 5c. Czujnik V103



Rys. 5d. Czujnik V116

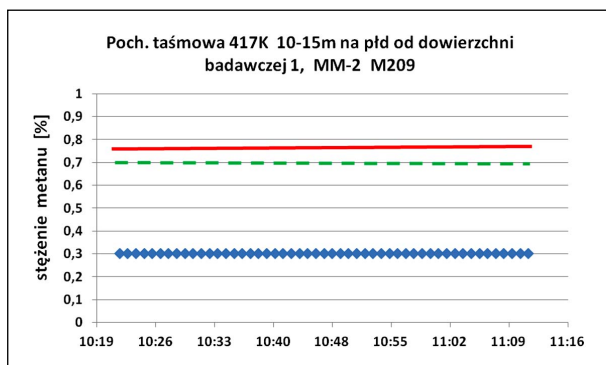


Rys. 5e. Czujnik V108

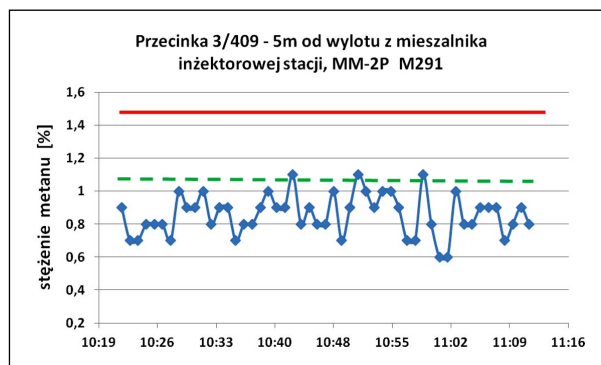


Rys. 5f. Czujnik V118

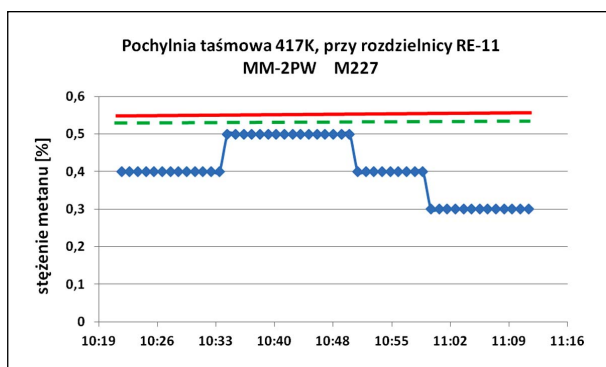
Rys. 5. Przebieg prędkości na kolejnych czujnikach anemometrycznych systemu gazometrycznego oraz odpowiadające wyniki symulacji
linia przerywana zielona – stan przed estymacją; linia ciągła czerwona – stan po estymacji



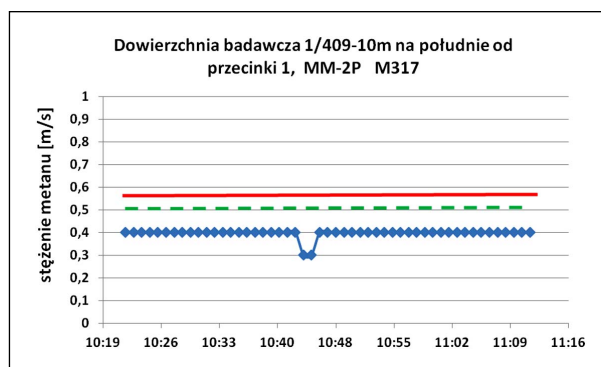
Rys. 6a. Czujnik M209



Rys. 6b. Czujnik M291



Rys. 6c. Czujnik M227



Rys. 6d. Czujnik M317

Rys. 6. Przebieg stężenia metanu na czujnikach gazometrii w rejonie ściany 2, 4, 5 oraz odpowiadające wyniki symulacji linia przerywana zielona – stan przed estymacją; linia ciągła czerwona – stan po estymacji

6. Podsumowanie, wnioski

Przedstawione w artykule zagadnienie walidacji modelu matematycznego rozptyłu mieszaniny powietrzno-metanowej w wyrobiskach kopalni dostarcza pierwsze dane dla analizy możliwości realizacji zastosowania metod optymalizacji numerycznych do estymacji parametrów modelu. We wcześniejszych pracach (Dziurzyński et al., 2001, 2005, 2007a, 2007b, 2008, 2009, 2011) dla wyznaczenia tzw. początkowego rozptyłu powietrza dokonywano ręcznej korekty parametru modelu, którym był opór aerodynamiczny lub pole przekroju poprzecznego wyrobiska. Po wykonanej korekcie wykonywano obliczenia rozptyłu powietrza programem komputerowym *VenZroby* i porównywano obliczony przebieg prędkości przepływu powietrza z zapisem czujnika anemometrycznego systemu monitoringu. Czynności te powtarzano, aż do uzyskania dobrej zgodności ocenianej przez wprowadzoną miarę odległości szeregów czasowych (12). Obecnie podjęto próbę opracowania algorytmu automatycznego dopasowania wybranego parametru modelu. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analizując otrzymane wyniki estymacji prognozy rozptyłu powietrza można zwrócić uwagę na malejący w funkcji ilości iteracji wykres funkcji celu z charakterystycznymi lokalnymi odchyleniami, odpowiadającymi w procesie estymacji obliczaniom nowych wartości gradientów funkcji celu S , pokazany na Rys. 3. Po początkowym okresie szybkiego spadku następuje okres wolnego zmniejszania się wartości funkcji celu, związany z malejącymi zmianami oporów bocznic (20), które z kolei wynikają z malejących wartości składowych gradientu funkcji celu (21). W związku z tym należałoby rozpatrzyć możliwość modyfikacji współczynnika β w wzorze (20) tak, aby uzyskać większą szybkość spadku wartości funkcji celu S .
2. Na kolejnym rysunku (Rys. 4) pokazano zmiany oporów obliczane w trakcie procesu estymacji w bocznicach, w których zainstalowane były czujniki prędkości przepływu powietrza systemu monitoringu wentylacji. Z przebiegów pokazanych na wykresach dla czujników V102, V103 i V105 wynika, że

procedura estymacji zakończyła się zbyt wcześnie, ponieważ wartości oporów obliczane dla tych bocznic nie osiągnęły stanu ustalonego. W następstwie należy zmniejszyć stałą α w nierówności $|S - S_N| < \alpha$ w algorytmie estymacji podanym w rozdz. 4, gdzie $S - S_N$ jest różnicą między poprzednią i następną wartością funkcji celu obliczoną w procesie iteracji.

3. Wartości strumieni objętości w bocznicach obliczone przez program *VentZroby* z modułem estymacji prognozy dla stanów przed i po estymacji, pokazane na Rys. 5a-f na tle przebiegów zarejestrowanych przez system monitoringu w większości przypadków pokazują zmiany w prawidłowym kierunku (Rys. 5a, 5c, 5d, 5e), jednak dokładniejsza analiza pokazuje, że przyjęty sposób obliczania wartości strumieni objętości powietrza z systemu monitoringu jako wielkości wejściowych do obliczania funkcji celu może prowadzić do błędnych wyników, ponieważ w obliczeniach, stosując kryterium najmniejszej miary odległości, wykorzystuje przebiegi strumieni objętości powietrza w bocznicach wyznaczone z zarejestrowanych w systemie monitoringu prędkości powietrza, które są silnie zaburzone i mają charakter losowy. Dlatego należy rozważyć zmianę tego kryterium i jako wielkości wejściowe do obliczania miary odległości jako funkcji celu w procedurze estymacji przyjmując 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 również zwrócić uwagę na bardzo małe zmiany strumienia objętości powietrza przed i po estymacji w bocznicach z czujnikami V118 pokazane na Rys. 5f, czemu odpowiada praktycznie brak zmian oporu tej bocznic, pokazany na Rys. 4f. Wskazuje to na bardzo małą wartość składowej gradientu funkcji celu dla tej bocznic, co powoduje, że obliczane z wzoru (20) wartości oporu bocznic pozostają prawie stałe. Należy rozważyć wprowadzenie w funkcji celu współczynników wagi różnych od 1, aby zróżnicować w funkcji celu udziały różnic strumieni objętości powietrza z symulacji i z monitoringu. Sposób i kryteria wyboru wartości współczynników wymagają dalszych prac badawczych.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawiony sposób estymacji prognozy rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej kopalni z zastosowaniem minimalizacji funkcji celu metodą gradientu (najszybszego spadku) realizuje prawidłowo zadanie minimalizacji, co pokazuje Rys. 3 i w kolejnym etapie badań może być rozszerzony o estymację prognozy udziałów objętościowych metanu w powietrzu w bocznicach sieci z wykorzystaniem wartości tych udziałów mierzonych przez czujniki systemu gazometrycznego kopalnianej sieci wentylacyjnej.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7. Literatura

- [1] Dziurzyński W., Pałka T., Tracz J., 1995.: *Optymalny rozkład czujników w celu minimalizacji błędów pomiarowych*, Zadanie Z 09, Temat T 03 "Stany nieustalone w kopalnianych sieciach wentylacyjnych", Sprawozdanie z działalności statutowej, IMG PAN, (1995).
- [2] Dziurzyński W., Pałka T., 2000: *Algorytmy komputerowej symulacji procesu przewietrzania umożliwiające dostęp i wykorzystanie danych systemu monitoringu sieci wentylacyjnej*. Prace IMG PAN, T. 2, Nr 1-2, s. 161-176, (2000).
- [3] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., 2001: *Prognozowanie rozkładu stężenia metanu w sieci wentylacyjnej z uwzględnieniem systemu monitoringu*. Prace IMG PAN, T. 3, Nr 2, s. 163-182, (2001).
- [4] Dziurzyński W., Krach A., J Krawczyk, Pałka T., 2005: *Walidacja modelu matematycznego przewietrzania kopalni stosowanego w programie VentMet z wykorzystaniem bazy danych pomiarowych wybranego rejonu wentylacyjnego KWK*. Prace IMG PAN, T. 7, Nr 1-2, s. 101-115, (2005).
- [5] Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T., 2007: *Zastosowanie miary odległości szeregów czasowych do walidacji modelu matematycznego przewietrzania kopalni stosowanego w programie VentMet*. Przegląd Górniczy nr 1, (2007).
- [6] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski St., 2007: *Walidacja komputerowego programu symulacji wentylacji VentMet dla rejonu ściany, z uwzględnieniem zmiennych w czasie źródeł metanu, związanych z cykliczną pracą kombajnu*. Prace IMG PAN, T. 9, Nr 1-4, s. 3-26, (2007).
- [7] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski St., 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, (2008).

- [8] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski St., 2009: *Walidacja procedur programu VentZroby z wykorzystaniem systemu monitoringu stanu atmosfery kopalni*. Prace IMG PAN, T. 11, Nr 1-4, s. 79-112, (2009).
- [9] Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski St., 2011: *Opracowanie narzędzi programowych dla celów odtworzenia zaistniałych zdarzeń i katastrof oraz ich weryfikacja na podstawie danych „post”*, Prace IMG PAN, T. 12, Nr 1-4, (2011).
- [10] Kolarczyk M. 2004: *Wybrane właściwości pełnej macierzy wrażliwości wydatków powietrza na zmiany oporów bocznic w kopalnianej sieci wentylacyjnej*. 3 Szkoła Aerologii Górniczej, Zakopane (2004).
- [11] 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 (2007).
- [12] Krawczyk J., Kruczkowski J. 2009: *Badanie przepływu powietrza „in situ” w wyrobiskach górniczych, wyznaczeniem kryterium przydatności przyrządów i metod*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 11, Nr 1-4, s. 147-158, (2009).
- [13] Wasilewski St., 1996: *Badania przepływu powietrza w kopalni*. Archives of Mining Sciences, t. 41 nr 4 s. 411- 438, (1996).
- [14] Wasilewski St., 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, (2007).
- [15] Wasilewski St., 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, (2010).

Validation of a computer programme for prognosticating the mine airing conditions based on numerical optimisation methods

Abstract

The experience gathered during the validation of the mathematical model underpinning the computer program *VentZroby* reveals the complexity of the issue, caused by the large number quantities to be considered as well as their variability patterns. It is assumed that the reliability of the forecast of airing conditions in the mine obtained from simulations is associated with the reliability of the quality of fit between the simulated and real ventilation networks.

The mathematical model was validated by verifying the numerical data and comparing them with measurement results obtained from the sensors making up the monitoring system. Validation tests performed between 2000-2011 were based on qualitative criteria of simulated time patterns of particular quantities (Dziurzyński et al. 2001, 2005, 2007a, 2007b, 2008, 2009, 2011). Validation of the simulation programme was first based on a procedure using the measure of distance between the prognosticated results and monitoring data in the form of the sum of squared differences between measured and prognosticated results, with the appropriate weights. Now it is suggested that this measure should be an objective function minimised by the selected method of numerical optimisation. The measure of distance of time series is well applicable to numerical methods of minimisation of the objective function and so attempts can be made to automate the verification of mathematical model parameters used in the program *VentZroby*.

In the first place the algorithm was developed for automatic optimisation of the selected model parameter (volumetric airflow rate). The objective function was defined as the normalised squared distance between the prognosticated and real vectors of state, and the vectors components include the volumetric flow rate of air- those prognosticated and calculated from flow velocity measurements by the anemometers located at selected points in the mine and making up the monitoring system. Then the numerical optimisation algorithm was developed, supported by new procedures in the computer program *VentZroby*. The procedures will be tested on an example and the numerical model and data from the monitoring system will allow us to test the adequacy of the adopted method of numerical optimisation of estimation of the ventilation network condition. Results are shown in the form of graphs and tables. The summing-up section gives conclusions confirming the difficulties involved in validation procedures, mostly due to complexity of the mathematical airflow model and the fact that good-quality measurement data from the monitoring sensors are hard to obtain.

Keywords: prognosticating of the airing condition, validation of the computer program, methane hazard, safety