

Zintegrowany system monitorowania i analizy zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej

W polskich kopalniach węgla kamiennego o wysokim zagrożeniu metanowym powszechnie stosowane są systemy automatycznego monitoringu parametrów powietrza oraz systemy obliczeniowe wykorzystywane przez służby wentylacyjne w działalności profilaktycznej, badaniach symulacyjnych i pracach projektowych. Systemy te działają niezależnie, a dane pomiarowe, potrzebne do obliczeń wentylacyjnych, wykorzystuje się w niewielkim stopniu, wyłącznie w układzie off-line. W efekcie obliczenia wykonuje się na danych nieaktualnych, a wyniki często znacznie odbiegają od rzeczywistości. W ramach projektu europejskiego o akronimie AVENTO dokonano integracji systemów, umożliwiając ciągle zasilanie programów obliczeniowych danymi pomiarowymi w czasie rzeczywistym. Integracja systemów umożliwia bieżącą obserwację zmian parametrów przewietrzania i poziomu zagrożenia metanowego, a także obliczanie wymaganych przepisami wskaźników zagrożenia oraz bilansu metanu odprowadzonego drogami wentylacyjnymi i rurociągami systemu degazacji. W artykule omówiono sposób integracji, strukturę i najważniejsze moduły oprogramowania oraz wybrane wyniki badań in situ zintegrowanego systemu.

Słowa kluczowe: zagrożenia metanowe, wentylacja, systemy monitorowania.

1. WPROWADZENIE

Głównym źródłem ryzyka w górnictwie węglowym są zagrożenia naturalne [22], w szczególności te, które związane są z przewietrzaniem [9, 18]. Do najbardziej niebezpiecznych należą zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego [10] oraz zagrożenie pożarem endogenicznym [20, 22]. Poważny wpływ na poziom zagrożeń wentylacyjnych ma także aktywność sejsmiczna górotworu [2, 11, 24]. W wielu polskich kopalniach zagrożenia wentylacyjne i sejsmiczne występują jednocześnie, tworząc system wzajemnie na siebie wpływających zagrożeń skojarzonych. Warunkiem bezpiecznej i efektywnej eksploatacji jest efektywna profilaktyka, tj. wczesna identyfikacja i zwalczanie zagrożeń. W działaniach tych, oprócz znajomości aktualnego stanu sieci wentylacyjnej, duże znaczenie ma umiejętność długo- [16] i krótkoterminowego [5, 18] prognozowania

przyszłego rozwoju poziomu zagrożeń, co zwiększa efektywność podejmowanych środków prewencyjnych i prawdopodobieństwo uniknięcia stanów niebezpiecznych.

W polskim górnictwie węglowym zagrożenia naturalne, systemowe ich monitorowanie oraz rutynowe procedury oceny zagrożeń opisane są w formie aktu prawnego obowiązującego wszystkie kopalnie [29]. Poziom zagrożeń wentylacyjnych w kopalniach kontrolują stale rozwijające się systemy monitorowania [2, 8, 23, 27], które zapewniają m.in. ciągły pomiar najważniejszych parametrów powietrza w wyrobiskach (prędkość przepływu, temperatura, ciśnienie, stężenie gazów) i sygnalizację stanów przekraczających ustalone kryteria. Przy ocenie ryzyka wynikającego z oddziaływania zagrożeń i planowaniu przez służby kopalniane działań profilaktycznych stosowane są programy obliczeń wentylacyjnych [6, 7, 21, 25], wykorzystujące w układzie off-line dane pomiarowe z systemów monito-

rowania, uzupełnione wynikami pomiarów ręcznych. Praktyka wykazuje, że stosowana metodyka nie daje zadowalających rezultatów. Podstawową przyczyną tego stanu rzeczy jest niezwykle pracochłonna i czasochłonna procedura kompletowania danych pomiarowych, co sprawia, że wszelkie analizy i badania symulacyjne związane z analizą ryzyka wykonywane są na danych nieaktualnych.

W celu wyeliminowania tych niedogodności podjęto pracę badawczą „Zaawansowane narzędzia do kontroli wentylacji i emisji metanu AVENTO”, współfinansowaną z europejskiego funduszu Coal&Steel. Celem badań było opracowanie metod i narzędzi pozwalających na zintegrowanie stosowanych w kopalniach systemów monitorowania parametrów środowiska z szeregiem istniejących lub udoskonalonych bądź wytworzonych w ramach realizacji projektu programów komputerowych przeznaczonych dla służb wentylacyjnych. Narzędzia te mają umożliwić m.in. analizę kopalnianej sieci wentylacyjnej w działaniach związanych z bieżącą kontrolą stanu wentylacji, profilaktyką metanową i pożarową oraz w sytuacjach kryzysowych. Istotą badań było udoskonalenie mechanizmów symulacji sieci wentylacyjnej, opracowanie metod krótkoterminowego prognozowania stężenia metanu oraz stworzenie mechanizmu bezpośredniego dostępu programów analizy sieci wentylacyjnej do baz danych systemów monitorowania środowiska (gazometrycznego). Badania te pozwoliły na kontrolę zmian stanu zagrożeń i parametrów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym. Założenia projektu, a także cząstkowe wyniki prowadzonych badań, konsultowano na bieżąco z przedstawicielami służb wentylacyjnych kopalń, dla których przeznaczone są opracowane narzędzia.

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych zrealizowanych przez Instytut Technik Innowacyjnych EMAG. Prace prowadzone były w dwóch głównych kierunkach:

1. modyfikacja systemu programów obliczeń wentylacyjnych i systemu monitorowania stanu sieci wentylacyjnej w celu umożliwienia ich współpracy w czasie rzeczywistym,
2. implementacja funkcji bilansu metanowego umożliwiających bieżącą ocenę poziomu zagrożenia metanowego w rejonach ścian wydobywczych z uwzględnieniem wydajności odmetanowania.

Projekt obejmował także badania z zakresu krótkoterminowych prognoz zagrożenia metanowego z wykorzystaniem metod wnioskowania maszynowego. Ich wyniki są przedmiotem oddzielnej publikacji.

2. MONITOROWANIE ŚRODOWISKA ORAZ OBLICZENIA WENTYLACYJNE W POLSKICH KOPALNIACH – STAN AKTUALNY

2.1. Monitorowanie parametrów środowiska

Monitorowanie środowiska wentylacyjnego w polskich kopalniach prowadzone jest przez systemy opracowane przez różnych producentów (EMAG, HASO, MICON, Carboautomatyka) [2]. Pomimo odmiennych szczegółowych rozwiązań technicznych posiadają one strukturę funkcjonalną (rys. 1) zawierającą następujące podstawowe elementy:

- czujniki pomiarowe,
- układ transmisji i zasilania,
- blok archiwizacji danych,
- blok wizualizacji i alarmowania na stanowisku dyspozytora bezpieczeństwa.

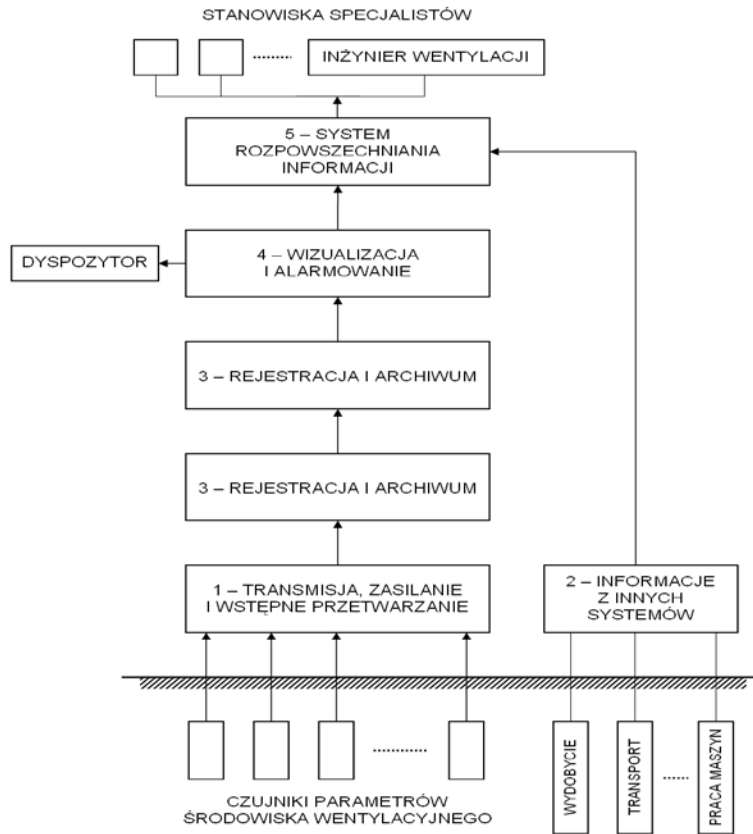
Wybrane dane pomiarowe trafiają do stanowisk operatorskich specjalistycznych służb kopalni. Jednym z ważniejszych użytkowników zbieranych w ten sposób danych jest dział wentylacji.

Do podstawowych funkcji systemów w zakresie monitorowania zagrożenia metanowego należą:

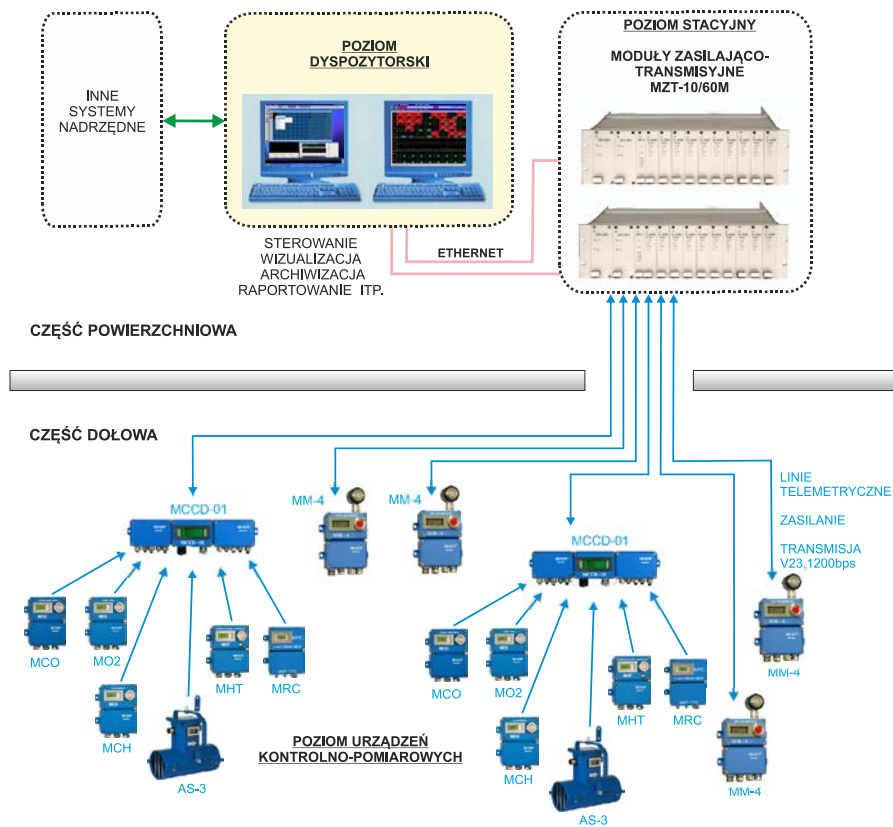
- ciągły pomiar stężenia metanu i innych parametrów powietrza w wyrobiskach i rurociągach sieci odmetanowania,
- monitorowanie stanu urządzeń wentylacyjnych (tamy, wentylatory) oraz wybranych maszyn i urządzeń technologicznych istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa,
- automatyczne wyłączanie zasilania maszyn i urządzeń dołowych w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości stężenia metanu,
- wizualizacja danych w punkcie dyspozytorskim, alarmowanie przekroczeń dopuszczalnych poziomów mierzonych parametrów,
- archiwizacja i raportowanie danych pomiarowych i zdarzeń.

Przykładem systemu monitorowania parametrów środowiska jest SMP-NT, rozwijany od wczesnych lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia i stosowany w większości polskich, a także w kilku ukraińskich i białoruskich kopalniach węgla kamiennego [14, 23]. Budowę i zasadę działania tego systemu przedstawia schemat poglądowy na rys. 2.

Charakterystyczną cechą systemu SMP-NT, podobnie jak systemów innych producentów, jest gwiazdista topologia urządzeniowa umożliwiająca zdalne zasilanie dołowych urządzeń pomiarowych z powierzchni. Zaletą tego rozwiązania jest zapewnienie ciągłości pracy w stanach awaryjnych i kryzysowych, gdy podziemna sieć elektroenergetyczna jest wyłączona, np. z powodu przekroczonych norm stężenia metanu.



Rys. 1. Struktura funkcjonalna systemu monitorowania środowiska w kopalni



Rys. 2. System monitorowania parametrów środowiska SMP-NT

Przeważająca większość polskich kopalń węgla kamiennego eksploatuje pokłady o wysokiej zawartości metanu, dlatego w praktycznych aplikacjach systemu najliczniejszą grupę dolowych urządzeń pomiarowych stanowią czujniki metanu. Powszechnie stosowane są także czujniki prędkości przepływu powietrza i czujniki tlenu węgla, wykorzystywane w profilaktyce przeciwpożarowej, oraz w mniejszych ilościach – przyrządy do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza, zawartości dwutlenku węgla i innych gazów domieszkowych. W ostatnich latach coraz częściej instalowane są czujniki ciśnienia bezwzględnego w punktach węzłowych sieci wentylacyjnej, których stosowanie ma istotne znaczenie z punktu widzenia dokładności i wiarygodności obliczeń rozplywu powietrza.

Oprócz wielkości analogowych system SMP-NT kontroluje stan dużej liczby czujników dwustanowych (np. stan urządzeń wentylacyjnych), ma także możliwość dwustanowego sterowania urządzeniami służącymi do automatycznego wyłączania zasilania maszyn i urządzeń oraz sygnalizacji stanów niebezpiecznych. Stan wszystkich czujników, zarówno analogowych, jak i dwustanowych jest kontrolowany i rejestrowany w archiwum systemu SMP-NT z okresem próbkowania wynoszącym dwie sekundy.

2.2. Obliczenia wentylacyjne

Do celów obliczeniowych sieć opisuje się modelem w postaci zorientowanego grafu (o ustalonych kierunkach przepływu powietrza) złożonego z N węzłów i M krawędzi (bocznicy). Bocznice reprezentują wszelkiego rodzaju drogi, którymi może przepływać powietrze. Węzły są połączeniami pomiędzy drogami przepływu. Każdej bocznicy przyporządkowuje się parametr zwany oporem aerodynamicznym [15, 28], wyrażający wpływ tarcia, jakie musi pokonać przepływające powietrze. Do pokonania wynikających stąd spadków ciśnienia służą wentylatory wytwarzające ciśnienie o wartości zapewniającej wymagany rozplyw powietrza. Oprócz wytwarzanej przez wentylatory depresji mechanicznej w bocznicach generowana jest depresja naturalna, której wielkość zależy od temperatury powietrza i wysokości niwelacyjnych węzłów bocznicy.

Do obliczeń rozplywu powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej wykorzystuje się nieliniowy układ równań wyrażających zasadę zachowania masy i energii, znanych pod nazwą praw Kirchhoffa. Są to:

1. Równania węzłowe:

$$\sum_{i=1}^N b_{ki} \cdot q_i = 0 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad k = 1, 2, \dots, P-1 \quad (1)$$

2. Równania oczkowe:

$$\sum_{i=1}^N c_{ji} \cdot (H_i - R_i q_i^2 \text{sgn } q) = 0 \quad [\text{Pa}] \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

gdzie:

- N – liczba bocznicy,
- P – liczba węzłów,
- $M = N - P + 1$ – liczba cyklicznych grafów odwzorowujących sieć wentylacyjną,
- b_{ki}, c_{ki} – elementy macierzy węzłowo-bocznicy i oczkowej, opisujących topologię sieci wentylacyjnej,
- H_i – suma depresji naturalnej i mechanicznej w i -tej bocznicy,
- R_i – opór aerodynamiczny i -tej bocznicy,
- q_i – wydatek objętościowy powietrza w i -tej bocznicy.

Parametry modelu sieci wentylacyjnej ulegają zmianie, dlatego programy takie uruchamia się co jakiś czas po to, aby stwierdzić, czy zachowane są warunki bezpiecznej eksploatacji. Wyznaczenie nowego stanu (parametrów modelu sieci) wymaga przygotowania wsadu w postaci skorygowanych parametrów sieci, z reguły na podstawie pomiarów wykonywanych przyrządami ręcznymi i/lub danych pomiarowych systemu gazometrycznego, wprowadzanych do systemu obliczeń wentylacyjnych metodą off-line. Dzięki integracji z systemem gazometrycznym model sieci może być korygowany na bieżąco, w krańcowym przypadku po każdym odczycie wskazań czujników systemu gazometrycznego. Ta quasi-dynamiczna metoda umożliwia uzyskanie zapisu całego procesu przejścia sieci wentylacyjnej z jednego stanu (starego) do nowego (aktualnego).

Sieci wentylacyjne współczesnych polskich kopalń charakteryzują się złożoną strukturą, składającą się z kilkuset bocznicy i węzłów. Każda zmiana struktury lub parametrów sieci wymaga przeprowadzenia pomiarów ilościowych powietrza, aktualizacji modelu i jej ponownego przeliczenia. Przeważająca większość stosowanych do tego celu komercyjnych programów obliczeń wentylacyjnych do rozwiązania układu równań modelu wykorzystuje iteracyjny algorytm Hard-Crossa [3, 28].

Wśród stosowanych w polskim górnictwie programów zarządzających siecią wentylacyjną kopalni można wymienić: AERO (Politechnika Śląska i firma IFK), Ventgraph (Instytut Mechaniki Górniczej PAN) oraz AutoWENT (Politechnika Wrocławska) [28]. W badaniach wykorzystano program AERO, który na tle innych systemów wyróżnia się kompleksowym ujęciem części obliczeniowej i dokumentacyjnej, szybkością działania, przyjaznym interfejsem użytkownika i pełną zgodnością z Polskimi Normami.

AERO zarządza, oblicza i bilansuje rozptyw powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Umożliwia modelowanie zmian, przeprowadzanie symulacji, a także dokumentowanie parametrów sieci. Współpracuje ze schematami przestrzennymi i kanonicznymi kopalni w środowisku AutoCAD. W sytuacjach awaryjnych program umożliwia wyznaczanie stref zagrożenia niebezpiecznymi gazami (np. CO, CH₄) wraz z wykazem zagrożonych bocznic i posterunków obserwacyjnych. Możliwe jest także automatyczne obliczanie parametrów sieci na podstawie wskazań czujników znajdujących się w zagrożonej strefie.

System składa się z dwóch podstawowych modułów – Programu Standardowego Wprowadzania Danych PSWD oraz z Modułu Graficznego pracującego w środowisku AutoCAD. Elementem pierwszego z wymienionych modułów jest właściwy program obliczeniowy, w którym do rozwiązania równań modelu wykorzystuje się algorytmy oparte na wspomnianej metodzie Hardy Crossa. Parametry niezbędne do pracy programu wprowadzane są do następujących zakładek:

- Węzły – współrzędne przestrzenne i parametry powietrza w punktach węzłowych struktury kopalnianej sieci wentylacyjnej,
- Wentylatory – parametry pracy wentylatorów; każdy z nich ma swoją charakterystykę, którą można edytować i wyświetlać w formie wykresu; wyliczane są także współczynniki wielomianu określającego charakterystykę wentylatora,
- Bocznicę – zapis matematycznego modelu sieci wentylacyjnej kopalni definiujący strukturę i parametry bocznic wentylacyjnych pomiędzy poszczególnymi węzłami.

Uzupełnieniem interfejsu AERO jest dedykowany edytor graficzny korzystający z danych zapisanych w części numerycznej i nanoszący je na szkielecie schematu przestrzennego. Dzięki temu możliwy jest podgląd struktury kopalni (schemat kanoniczny i przestrzenny) w programie AutoCAD. Za pomocą edytora graficznego istnieje także możliwość modyfikacji struktury kopalni i zmian parametrów sieci wentylacyjnej. Po wprowadzonych zmianach program przelicza całą sieć wentylacyjną i aktualizuje na schemacie wartości wyświetlanych parametrów.

3. INTELIGENTNY ZINTEGROWANY SYSTEM MONITOROWANIA

3.1. Funkcje zintegrowanego systemu

Standardowy system monitorowania (np. wykorzystany w projekcie system SMP-NT) posiada szereg funkcji bardzo potrzebnych korzystającemu z niego

administratorowi, jednak jego najważniejsza, podstawowa część jest ograniczona do pomiarów. Podobnie jest w przypadku systemu AERO – na podstawie danych uzyskanych przez system administrator nie jest w stanie na bieżąco kontrolować specyficznych parametrów sieci wentylacyjnej odnoszących się do analizy i oceny zagrożeń, w tym głównie zagrożenia metanowego.

Przedstawione w poprzednim rozdziale systemy SMP-NT oraz AERO wykonują szereg zadań związanych z monitorowaniem. Dokładniej, SMP-NT umożliwia bieżące monitorowanie i wizualizację aktualnie mierzonych wielkości pomiarowych, z kolei AREO przedstawia statyczny schemat sieci wentylacyjnej po zasileniu go danymi historycznymi. Taki stan rzeczy powoduje, że ocena zagrożenia metanowego tak naprawdę sprowadza się do:

- zapewnienia automatycznego wyłączenia prądu w przypadku przekroczenia na którymś z czujników krytycznej wartości metanu (SMP-NT),
- alarmowania w przypadku, gdy wartości któregoś z monitorowanych parametrów (np. anemometru lub czujnika otwarcia/zamknięcia tamy) są nieprawidłowe (SMP-NT),
- cyklicznej, zazwyczaj wykonywanej raz na kilka dni, analizy rozptyłów gazów i powietrza w pokładzie (AREO).

Opracowany w ramach projektu zintegrowany system monitorowania umożliwia nie tylko zasilanie systemu AREO aktualnymi danymi napływającymi on-line, ale zapewnia dwukierunkową komunikację pomiędzy SMP-NT i AREO oraz rozszerza funkcjonalność SMP-NT o możliwość analizy trendów i prognozowanie stężenia metanu (a także wskazań dowolnych innych czujników) za pomocą metod inteligencji obliczeniowej [12, 17, 19]. Rozwiązanie takie pozwala na bieżącą analizę i predykcję zagrożenia metanowego. Opracowany system ma zatem cechy inteligentnego systemu pomiarowego i informacyjnego [1, 4].

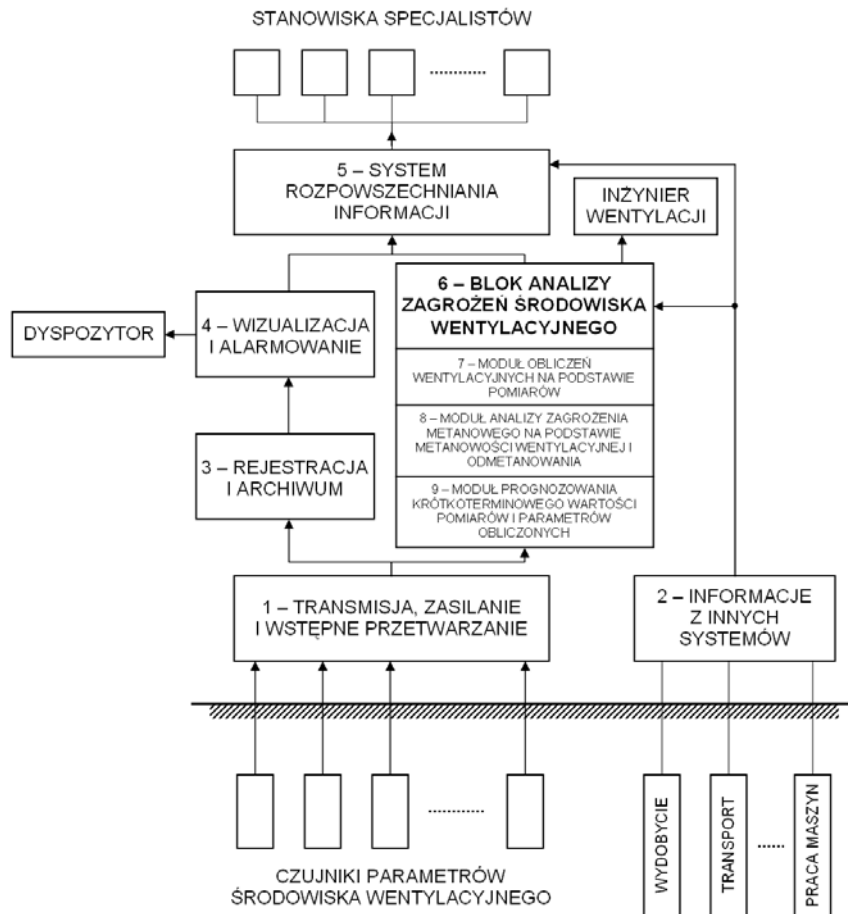
3.2. Struktura zintegrowanego systemu

Strukturę funkcjonalną nowego systemu przedstawiono na rys. 3. W stosunku do struktury przedstawionej na rys. 2. nowa zawiera dodatkowy blok programowy (6) realizujący obliczenia sieciowe, analizy bilansu metanowego i krótkoterminowe prognozy zmian zagrożenia metanowego.

Blok (6) jest on-line zasilany pomiarami z czujników systemu monitorowania środowiska za pośrednictwem opracowanej w ramach badań centralnej bazy danych oraz specjalnego protokołu komunikacyjnego. W praktyce oznacza to, że programy wcho-

dzące w skład bloku analizy pracują w każdym momencie na danych aktualnych. Wyniki obliczeń i analiz wraz z bieżącymi danymi pomiarowymi są zasadniczo przeznaczone dla służb wentylacyjnych

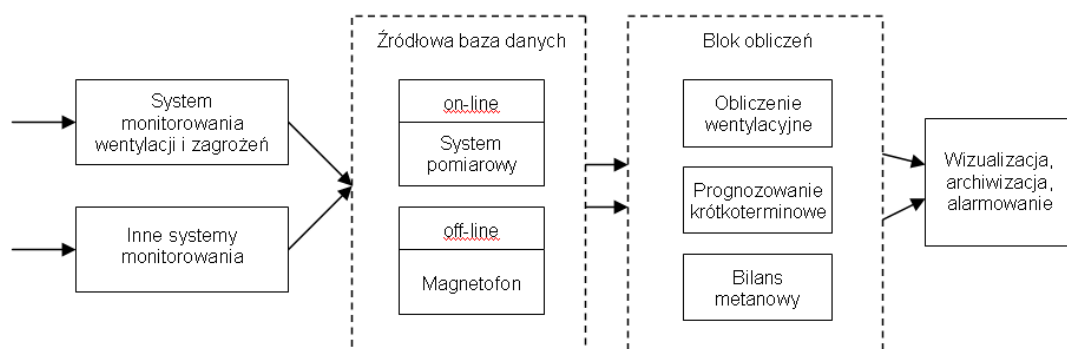
kopalni, niektóre z nich, np. krótkoterminowe prognozy zagrożenia metanowego, mogą też być wykorzystane w trybie on-line do sygnalizacji ostrzegawczej na stanowisku dyspozytora.



Rys. 3. Struktura funkcjonalna systemu monitorowania środowiska zintegrowanego z systemem obliczeń wentylacyjnych

3.3. Organizacja bloku analizy środowiska wentylacyjnego

Schemat przepływu danych w zintegrowanym systemie monitorowania przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy warstwy programowej bloku analiz

Podstawą działania bloku jest zintegrowana baza danych źródłowych. Zadaniem bazy jest integracja i udostępnianie danych pomiarowych napływających z różnych systemów monitorowania (w szczególności z SMP-NT). Baza danych jest aktualizowana zgodnie z okresem próbkowania systemów monitorowania środowiska. Integracja danych polega m.in. na przypisaniu ich do konkretnego miejsca w kopalni (np. jednego wyrobiska) oraz sztucznym ujednoczeniu czasu próbkowania. Integracja dotycząca miejsca polega na ujednoczeniu nazewnictwa struktury kopalni i miejsca montażu czujników, a więc miejsca pochodzenia pomiarów. Dzięki predefiniowanemu zestawowi słowników – definiowanemu w czasie podłączenia kolejnego systemu do bazy danych – możliwe jest ujednoczenie nazw chodników wyrobisk etc., które w różnych systemach mogą być (i często tak właśnie jest) różne nazywane i oznaczane. Sztuczne ujednoczenie czasu próbkowania polega na tym, że z zintegrowanej bazy danych na zewnątrz udostępniany jest zawsze jeden pełny wektor pomiarowy, zawierający wyniki wszystkich pomiarów przechowywanych w bazie. Wektor ten jest aktualizowany (udostępniany) zgodnie z najkrótszym czasem próbkowania. Przykładowo, jeśli najkrótszym czasem próbkowania (np. 2 s) charakteryzuje się konkretny metanomierz, np. MM116, to cykl udostępniania wektora danych do dalszej analizy wynosi również 2 sekundy. Oczywiście pomiary pochodzące z czujników o dłuższym czasie próbkowania będą zmieniały się w udostępnianym wektorze co kilka cykli.

Oprócz pracy on-line przewidziano także inną metodę udostępniania danych źródłowych. Metoda ta polega na jednokrotnym zasileniu baz danymi archiwalnymi i odtwarzaniu tych danych w warunkach symulacyjnych – bez konieczności podłączenia on-line do systemu pracującego w kopalni. Umożliwia to odtworzenie przebiegów zmierzonych parametrów, czyli pełnowymiarową symulację działania rzeczywistego systemu monitorowania, zgodnie z rzeczywistymi zmianami parametrów stanu obiektu. Metodę tę wykorzystano w trakcie prac badawczych związanych z realizacją projektu.

3.4. Moduł obliczania sieci wentylacyjnej z uwzględnieniem pomiarów on-line

Głównym elementem modułu jest zmodyfikowany program AERO wraz z jego częścią konfiguracyjną, edytorem i graficznym interfejsem użytkownika. W ramach przeprowadzonych prac pakiet uzupełniono tak, aby możliwe było bezpośrednie pobieranie informacji z zintegrowanej bazy danych pomiarowych. Dzięki temu zapewniono ciągłą aktualizację

modelu matematycznego sieci wentylacyjnej kopalni w czasie rzeczywistym.

Dokładniej, model matematyczny przeliczany jest zgodnie z interwałem czasowym zdefiniowanym przez użytkownika. Ponieważ bazuje on na uśrednionych danych pomiarowych, podczas jego przeliczania rozważane są uśrednione wartości najnowszych danych pomiarowych. Przeliczenie modelu matematycznego wymaga zatem podania wartości dwóch parametrów: częstotliwości przeliczania modelu oraz szerokości okna pomiarowego na podstawie którego mają zostać obliczone wartości średnie.

W trakcie badań stwierdzono, że pomimo wysokiego stopnia skomplikowania struktury sieci wentylacyjnej współczesnych kopalń, składającej się z kilkuset wyrobisk, i związanej z tym czasochłonności obliczeń wentylacyjnych, zastosowany mechanizm integracji i wprowadzone do programu AREO modyfikacje umożliwiają przeliczenie całej sieci w czasie stosunkowo krótkim, wynoszącym maksymalnie kilka sekund. W praktyce, za wyjątkiem sytuacji kryzysowych, nie ma potrzeby tak częstego przeliczania całej sieci, dlatego mechanizm integracji przewiduje możliwość definiowania parametrów czasowych modułu i metody agregacji (uśredniania) danych zasilających moduł obliczeń wentylacyjnych.

Dzięki zastosowaniu elementu pośredniczącego źródłem danych dla nowej wersji programu AREO może być dowolny system pomiarowy zasilający zintegrowaną bazę danych.

3.5. Moduł bilansu metanowego rejonu ściany wydobywczej

Głównymi miejscami występowania w kopalniach metanu są rejonu ścian wydobywczych [13, 26]. Metan wydzielający się z kalizny węglowej, urobionego i transportowanego węgla oraz ze zrobów zawalonych odprowadzany jest wraz z powietrzem wentylacyjnym do szybu wydechowego. W kopalniach eksploatujących pokłady o wysokim nasyceniu metanem stosuje się dodatkową metodę odprowadzenia nadmiaru tego gazu z rejonu ściany w postaci systemu odmetanowania, składającego się z sieci otworów drenażowych i rurociągów transportujących metan bezpośrednio na powierzchnię, z pominięciem systemu wentylacyjnego. W ramach prowadzonych badań opracowano oprogramowanie umożliwiające bieżące wyznaczanie ilości gazu wydzielanego w rejonie ściany na podstawie dostarczanych przez bazę danych źródłowych informacji o stężeniu metanu i prędkości przepływu powietrza w wyrobiskach oraz parametrach mieszaniny powietrzno-metanowej w rurociągach systemu odmetanowania.

Do wyznaczania metanowości, czyli ilości metanu wydzielającego się w rejonie, w polskim górnictwie najczęściej stosuje się opracowaną w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” metodę [13], w której do obliczeń wykorzystuje się uśrednione wartości stężenia metanu i prędkości przepływu powietrza. Metanowość rejonu ściany wydobywczej charakteryzują następujące wskaźniki:

1. metanowość wentylacyjna (M_{VM}) – różnica pomiędzy ilością czystego metanu zmierzoną w wylotowym prądzie powietrza a ilością metanu dopływającego do rejonu ściany,
2. metanowość bezwzględna – suma ilości metanu wydzielającego się do powietrza opływowego (tzw. metanowość wentylacyjna) oraz metanu odprowadzanego rurociągami systemu odmetanowania,
3. metanowość kryterialna (M_{CM}) – maksymalna metanowość bezwzględna, uwzględniająca nierównomierność wydzielania metanu, przy której nie nastąpi przekroczenie dopuszczalnych stężeń w prądzie powietrza zużytego.

Na podstawie powyższych wartości możliwe jest wyznaczenie kolejnych parametrów. Kryterialna metanowość bezwzględna jest to maksymalna wartość metanowości bezwzględnej dla danych warunków przewietrzania i efektywności odmetanowania, przy której zawartość metanu w prądzie zużytego powietrza nie przekroczy wartości dopuszczalnej.

Jako jednostkę miary przyjmuje się m^3/min . Efektywność odmetanowania to procentowa ilość metanu odprowadzanego przez odmetanowanie, obliczana w stosunku do metanowości bezwzględnej. Opracowane oprogramowanie dokonuje porównania wartości metanowości wentylacyjnej z wartością metanowości kryterialnej oraz efektywności odmetanowania z efektywnością założoną w projekcie ściany wydobywczej. Ocena zagrożenia metanowego dokonywana jest według wskaźnika zagrożenia metanowego k_H (3) oraz wskaźnika efektywności odmetanowania k_E (4). Poziomy zagrożenia metanowego ustalane są zgodnie z tabelami 1. i 2.

$$k_H = \frac{M_{VM}}{M_{CM}} \quad (3)$$

gdzie:

M_{VM} – metanowość wentylacyjna [m^3/min],
 M_{CM} – metanowość kryterialna [m^3/min].

$$k_E = \frac{E_{DE}}{E} \quad (4)$$

gdzie:

E_{DE} – obliczona efektywność odmetanowania [%],
 E – zakładana efektywność odmetanowania [%].

Tabela 1.

Stopnie zagrożenia metanowego obliczone w zależności od wartości wskaźnika k_H

| k_H | Stopień zagrożenia metanowego |
|-------------|--|
| $\geq 1,0$ | ściana niebezpieczna, bardzo wysokie zagrożenie metanowe |
| [0,8 ; 1,0) | wysokie zagrożenie metanowe |
| [0,5 ; 0,8) | umiarkowane zagrożenie metanowe |
| [0,2 ; 0,5) | niskie zagrożenie metanowe |
| $< 0,2$ | brak zagrożenia |

Tabela 2.

Stopnie zagrożenia metanowego obliczone w zależności od wartości wskaźnika k_E

| k_E | Stopień efektywności odmetanowania |
|-------------|------------------------------------|
| $\geq 0,5$ | wysoka efektywność odmetanowania |
| [0,3 ; 0,5) | średnia efektywność odmetanowania |
| $< 0,3$ | niska efektywność odmetanowania |

W zależności od uzyskanych wskaźników podejmowane są decyzje mające na celu obniżenie poziomu zagrożenia metanowego do dopuszczalnego po-

ziomu (regulacja sieci wentylacyjnej, ograniczenie prędkości urabiania, zwiększenie skuteczności odmetanowania itp.).

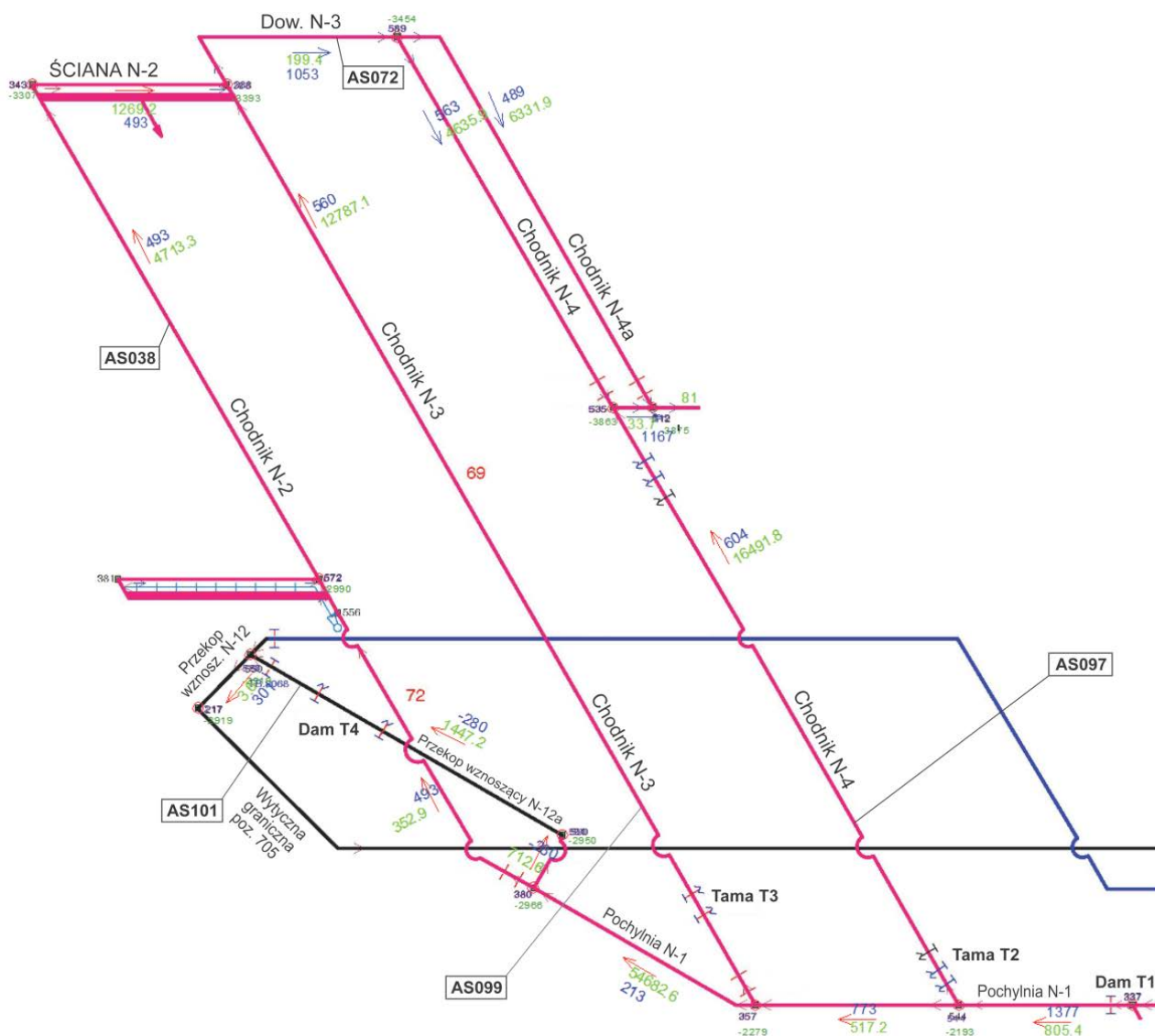
4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ ZINTEGROWANEGO SYSTEMU

4.1. Obliczenia sieci wentylacyjnej przy zmianach przepływu powietrza

Badania parametrów sieci wentylacyjnej przeprowadzono na podstawie danych pomiarowych zarejestrowanych podczas eksperymentu wentylacyjnego w rejonie ściany wydobywczej N-2, którego schemat, wykonany za pomocą programu AERO, przedstawiono na rys. 5. Celem badań było potwierdzenie poprawności działania mechanizmu integrującego systemu monitorowania i obliczeń wentylacyjnych, a w szczególności sprawdzenie, czy w warunkach istotnych zmian rozpyłu powietrza możliwe jest spełnienie uwarunkowań czasowych niezbędnych dla współpracy systemów w czasie rzeczywistym.

Ściana N-2 była przewietrzana sposobem na Y za pomocą głównego strumienia świeżego powietrza doprowadzanego chodnikiem N-2 i pomocniczego (doświeżającego) strumienia podawanego do punktu wylotowego ściany chodnikiem N-3. Do regulacji rozpyłu powietrza w obrębie rejonu służyły tamy regulacyjne T1, T2, T3 i T4. W stanie normalnym, przed rozpoczęciem eksperymentu, tama T1 była otwarta, pozostałe zamknięte.

Rejon był wyposażony w standardowy, zgodny z przepisami, zestaw stacjonarnych przyrządów pomiarowych, który na czas eksperymentu uzupełniono o dodatkowe czujniki ciśnienia bezwzględnego i prędkości przepływu powietrza zabudowane w wyrobiskach przyścianowych (wlot, wylot, doświeżanie). Ponadto zainstalowano czujnik parametrów odmetanowania w rurociągu zbiorczym odprowadzającym metan z górotworu i zrobów ściany.



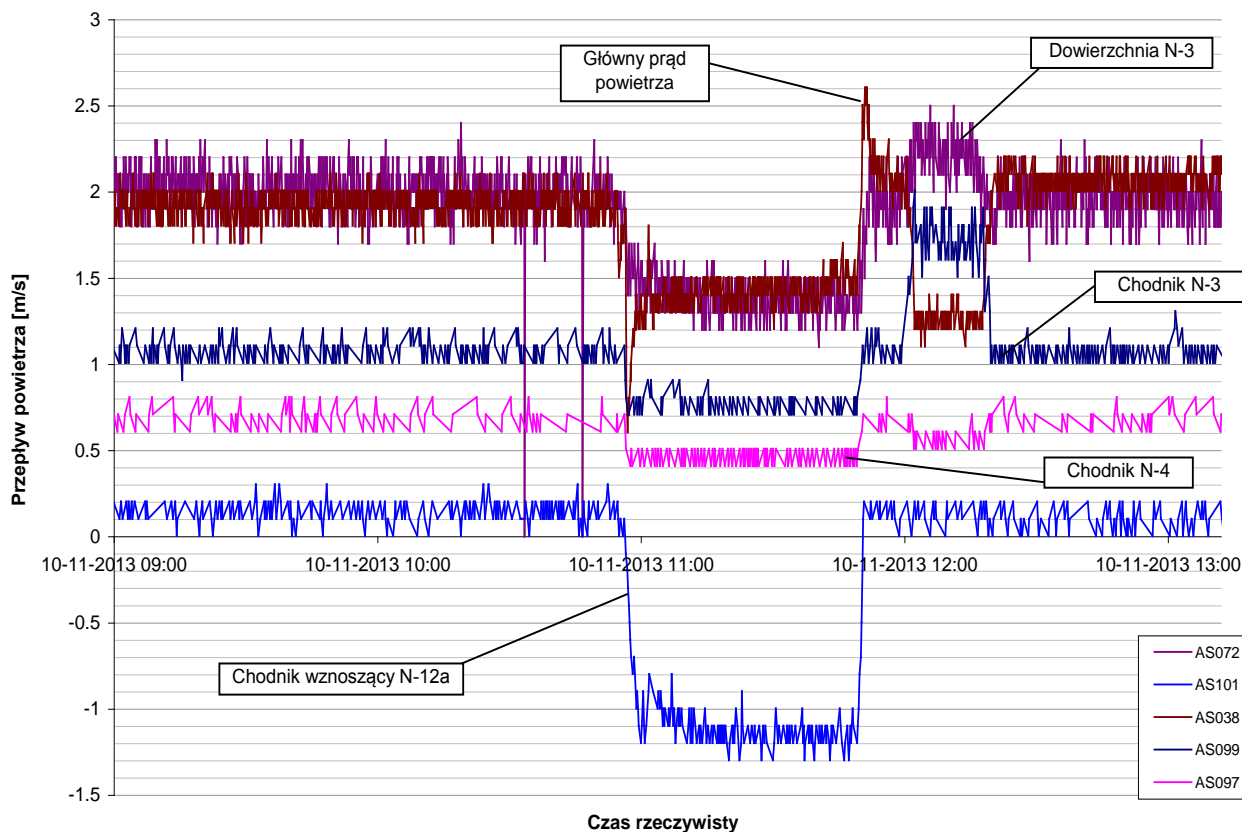
Rys. 5. Rejon ściany N-2 w czasie trwania eksperymentu wentylacyjnego

Ze względów bezpieczeństwa eksperyment przeprowadzono na zmianie nieprodukcyjnej. Polegał on na wywołaniu znacznych zaburzeń wentylacji rejonu poprzez zmiany położenia tam regulacyjnych T1 i T3. Harmonogram eksperymentu obejmował następujące etapy:

1. Stan I (wyjściowy) – T1 otwarta, T3 zamknięta.
2. Stan II (obniżenie dopływu powietrza do rejonu) – T1, T3 zamknięte.
3. Powrót do stanu wyjściowego.
4. Stan III (zmiana proporcji strumieni zasilających ścianę) – T1, T3 otwarte.
5. Powrót do stanu wyjściowego.

Przed eksperymentem i trakcie jego trwania w kilku istotnych punktach rejonu wykonano orientacyjne pomiary przepływu powietrza za pomocą przyrządów ręcznych.

Konsekwencją zamknięcia tamy T1 (stan I) były znaczne zmiany wydatków powietrza w wyrobiskach rejonu. Nastąpiło także odwrócenie prądu powietrza w przekopie wznoszącym N-12a w wyniku samoczynnego otwarcia tamy T4 i dopływu powietrza przez chodnik N-12a do pochylni N-1. Fakt ten potwierdziły pomiary wykonane przenośnym anemometrem. Wywołanym zmianom towarzyszyły stany przejściowe o znacznej amplitudzie i czasie trwania. Na rys. 6. przedstawiono przebiegi prędkości powietrza zarejestrowanych podczas eksperymentu.



Rys. 6. Przebiegi prędkości przepływu powietrza w rejonie ściany N-2 podczas zmian wentylacyjnych

Właściwe badania przeprowadzono w laboratorium komputerowym, wykorzystując archiwum kopalnianego systemu monitorowania, które w układzie z rys. 3. służyło jako baza danych źródłowych do symulacji rzeczywistych przebiegów za pomocą specjalnie zaprojektowanego programu pobierającego kolejne dane archiwalne z dwusekundowym okresem próbkowania, identycznym jak w systemie kopalnianym. Wyniki potwierdziły poprawność opracowanego w ramach projektu rozwiązania.

W tabeli 3. przedstawiono uśrednione wartości przepływów powietrza w ważniejszych bocznicach rejonu, obliczone przez program AERO dla stanu sprzed i w trakcie czynności regulacyjnych. W analizowanym przypadku przeliczenie sieci wentylacyjnej trwało zaledwie 4 sekundy, co jest czasem wystarczającym, nawet w przypadku konieczności przeprowadzenia symulacji w czasie prowadzenia akcji ratowniczych.

Tabela 3.

Wydatki powietrza w wybranych bocznicach rejonu ściany N-2

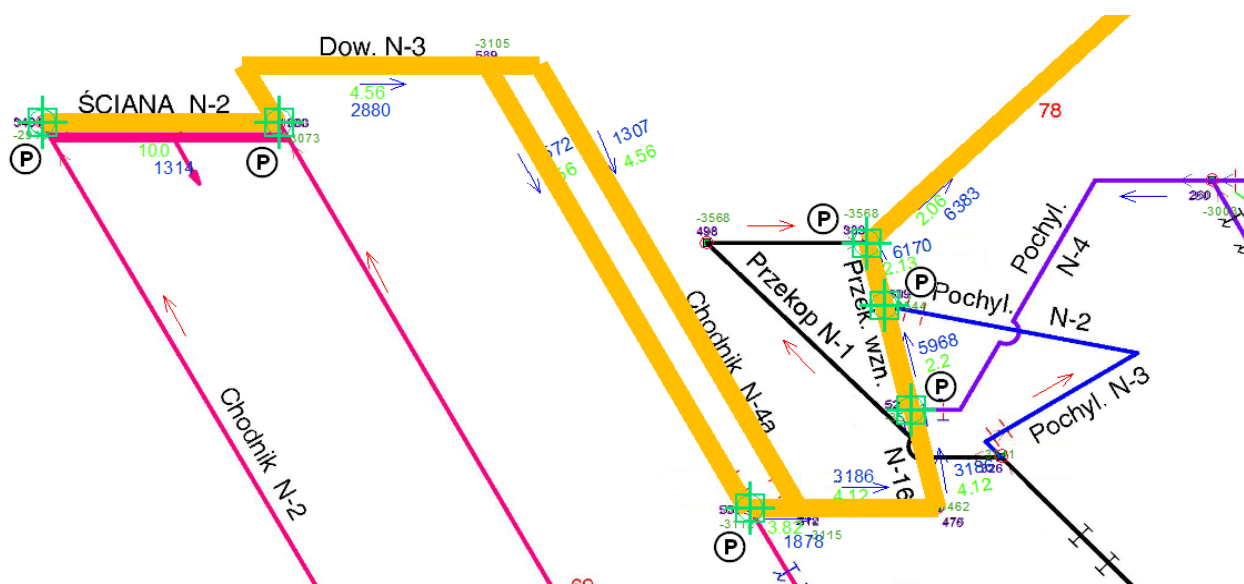
| Bocznica | Charakterystyka | Stan I T1 otwarta, T3 zamknięta [m ³ /min] | Stan II T1, T3 zamknięte [m ³ /min] | Stan III T1 otwarta, T3 zamknięta [m ³ /min] |
|----------|-----------------------|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 337-544 | Dopływ do rejonu | 3237 | 1377 | 3127 |
| 544-357 | | 2297 | 773 | 2160 |
| 544-535 | | 940 | 604 | 967 |
| 380-343 | Strumień zasilający | 1153 | 493 | 564 |
| 343-388 | Wyrobisko ścianowe | 1153 | 493 | 564 |
| 357-388 | Strumień doświeżający | 970 | 560 | 1142 |
| 380-550 | Prąd boczny | 173 | -280 | 454 |
| 388-589 | Wylot ściany | 2123 | 1053 | 1706 |
| 589-535 | Odpływy ze ściany | 876 | 563 | 928 |
| 589-512 | | 1248 | 489 | 778 |

4.2. Symulacja rozptyłu metanu od miejsca podwyższonego stężenia

Jednym z elementów badań była symulacja znaczącego wypływu metanu w wyrobisku ścianowym i obserwacja drogi przepływu gazu przez wyrobiska sieci wentylacyjnej. Efekt ten uzyskano, wprowadzając w wyrobisku ścianowym wirtualne źródło metanu, które spowodowało wzrost stężenia do 10% CH₄.

Po uruchomieniu symulacji program, w czasie niezauważalnym dla użytkownika, wygenerował strefę zagrożenia, tzn. wyznaczył drogę przepływu mieszaniny o podwyższonej zawartości metanu od miejsca wypływu do szybu wydechowego (kolor żółty)

i zaznaczył lokalizację tzw. posterunków (metanomierzy) obserwacyjnych (P) (rys. 7). Zagrożone bocznice oraz metanomierze obserwacyjne oznaczone są automatycznie innym kolorem, a przy strzałkach wskazujących kierunek przepływu program podaje wartości wydatku powietrza i procentowe wartości stężenia metanu. W systemie zintegrowanej symulacja taka jest uruchamiana automatycznie przez metanomierz w rejonie ściany przy przekroczeniu dopuszczalnych wartości stężenia metanu. Podobne symulacje można prowadzić również dla innych gazów, np. CO, CO₂, także dymu.

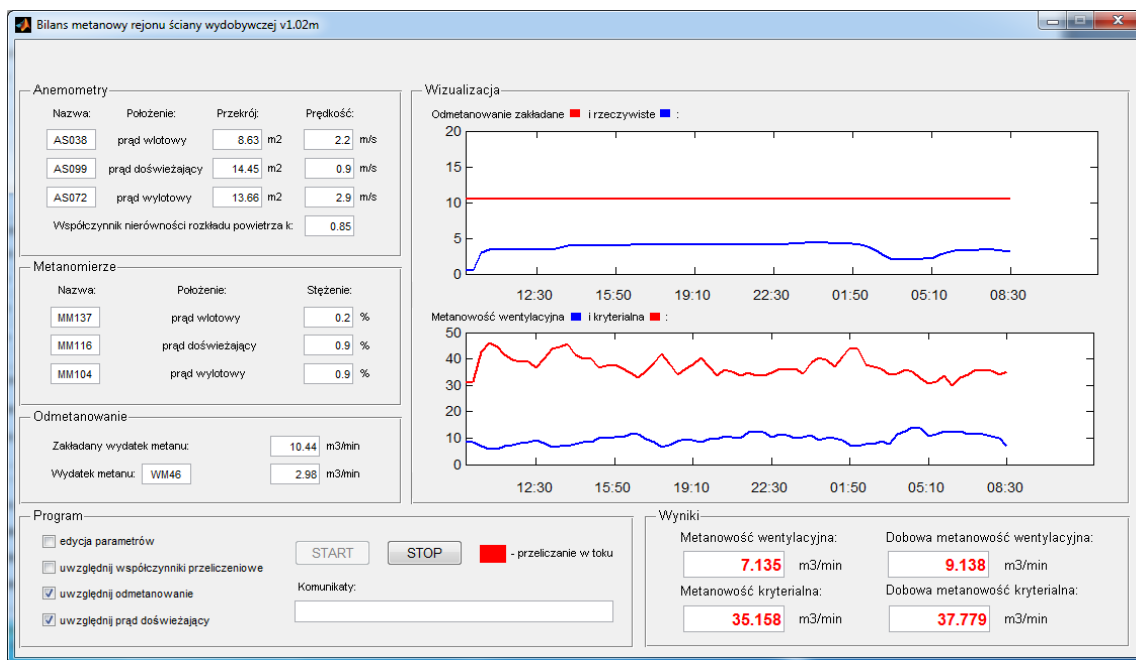


Rys. 7. Symulacja skutków wypływu metanu w wyrobisku ścianowym N-2

4.3. Wyznaczanie wskaźników metanowości rejonu ściany

W ramach prowadzonych prac zaimplementowano procedury pozwalające na obliczenie wskaźników metanowości na podstawie bieżących wartości wskaźników czujników.

Na rys. 8. widoczne jest okno tej części aplikacji, która odpowiedzialna jest za wyznaczenie wskaźników metanowości rejonu ściany. Wartości wskaźników mogą być obliczane w sposób ciągły lub na żądanie operatora systemu.



Rys. 8. Okno modułu bilansu metanowego rejonu ściany

Lewa część okna zawiera aktualne wskazania czujników, na podstawie których prowadzone są obliczenia, prawa – dobowe wykresy zakładanej i rzeczywistej wydajności odmetanowania (wykres górny) oraz metanowości wentylacyjnej i kryterialnej (wykres dolny).

W prawej dolnej części okna program podaje aktualne i dobowe wartości metanowości wentylacyjnej i kryterialnej. Na tej podstawie obliczane są wartości wskaźników (3) i (4) umożliwiające ocenę poziomu zagrożenia zgodnie z wartościami podanymi w tabelach 1. i 2. Informacje o wartości wskaźników (3) i (4) mogą być w sposób ciągły (on-line) przekazane zwrótnie do systemu SMP-NT lub dowolnego innego systemu dyspozytorskiego.

5. PODSUMOWANIE

Dla kompleksowej oceny stanu wentylacji oraz oceny poziomu zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej konieczne było opracowanie nowych bądź modyfikacja istniejących procedur obliczeniowych, w tym:

- obliczeń bieżących zmian parametrów sieci wentylacyjnej na podstawie pomiarów zmian ciśnienia i prędkości powietrza w bocznicach,
- obliczeń, uwzględniających czas rzeczywisty, przepływu metanu od źródła do szybu wylotowego na podstawie wskazań czujnika metanu przy źródle,
- oceny zagrożenia metanowego na podstawie na bieżąco analizowanej metanowości wentylacyjnej i kryterialnej oraz efektywności odmetanowania wykorzystującej pomiary z czujników prędkości przepływu powietrza, stężenia metanu oraz parametrów odmetanowania.

Wyniki przeprowadzonych testów potwierdziły poprawność działania nowego, inteligentnego zintegrowanego systemu monitorowania, analiz i prognozowania zagrożenia metanowego. Opracowany system znacznie rozszerza funkcjonalność rozwiązań stosowanych do tej pory. W chwili obecnej podejmowane są działania mające na celu rozszerzenie istniejących (w Polsce) systemów monitorowania zagrożeń metanowych o funkcje przedstawione w niniejszym artykule. Obserwujemy również zainteresowanie naszym rozwiązaniem ze strony kopalń chińskich.

Literatura

1. Bilewicz K.: *Smart metering – Inteligentny system pomiarowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
2. Cierpisz S., Miśkiewicz K., Wojacek A.: *Systemy gazometryczne w górnictwie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
3. Cross H.: *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin, No. 286, 1936.
4. Cuzzocrea A.: *Design, implementation and validation of AI-inspired information systems*. "Journal of Intelligent Information Systems", 2015, No. 45, pp.1-3.
5. Dixon W.D.: *A Statistical Analysis of Monitored Data for Methane Prediction*, Extended Abstract of PhD Dissertation, University of Nottingham, Dept. of Mining Engineering, 1992.
6. Dziurzyński W., Pałka T.: *Symulacja komputerowa procesu przewietrzania kopalni z wykorzystaniem danych monitoringu*, Materiały Szkoły Aerologii Górniczej, Wydawnictwo ITI EMAG, Katowice 2004, s. 77.
7. Dziurzyński W., Wasilewski S.: *Ocena zagrożenia metanowego w rejonie ściany na podstawie czujników gazometrii oraz symulacji komputerowej przepływu mieszaniny powietrza i metanu*. „Przegląd Górniczy”, 2012, nr 12, s. 28.
8. Gillies A.D.S., Wu H.W., Tuffs N., Sartor T.: *Development of a Real Time Airflow Monitoring and Control System*, Proceedings of the 10th US/North American Mine Ventilation Symposium, Anchorage, Alaska, USA, May 2004.
9. Hartman H.L., Mutmanský J.M., Ramani R.V., Wang Y.J.: *Mine ventilation and air conditioning*, New York: Wiley, 1997.
10. Kissel F.N.: *Handbook for Dust Control in Mining*, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh PA, USA 2003.
11. Konopko W., Kabiesz J., Cygankiewicz J.: *Wstrząsy i tąpnięcia jako inicjatory zagrożenia metanowego*. „Przegląd Górniczy”, 1994, nr 2, s. 29-34.
12. Koziełski M., Skowron A., Wróbel Ł., Sikora M.: *Regression rule learning for methane forecasting in coal mines*, International Conference – Beyond Databases Architectures and Structures, Communications in Computer and Information Science, 521, Springer 2015, pp.495-504.
13. Krause E., Łukowicz K.: *Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego*, Instrukcja nr 17, Główny Instytut Górnictwa, Mikołów 2004.
14. Krzystanek Z., Dylong A., Wojtas P.: *Monitorowanie parametrów środowiska w kopalniach węgla kamiennego – System SMP-NT*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2004, nr 9, s. 23-45.
15. McPherson M. J.: *Subsurface ventilation and environmental engineering*, Springer Science & Business Media 2012.
16. Noack K.: *Control of Gas Emission in Underground Coal Mines*. "International Journal of Coal Geology", 1998, No. 35, pp. 57-82.
17. Sikora M., Sikora B.: *Improving prediction models applied in systems monitoring natural hazards and machinery*. "International Journal of Applied Mathematics and Computer Science", 2012, No. 2(22), pp. 477-491.
18. Sikora M., Krzystanek Z., Bojko B., Śpiechowicz K.: *Application of a hybrid method of machine learning for description and on-line estimation of methane hazard in mine workings*. "Journal of Mining Sciences", 2011, No. (4)47, pp.493-505.
19. Sikora M., Krzystanek Z., Bojko B., Śpiechowicz K.: *Hybrid Adaptive System of Gas Concentration Prediction in Hard-Coal Mines*, Proc. of the 19th Int. Conf. on Systems Engineering, IEEE Computer Society (CPS), 2008, Las Vegas, Nevada, USA.
20. Stracher G.B., Praksh A., Sokol E.V. (eds.): *Coal and peat fires: A Global Perspective*, Case studies – Coal fires, Elsevier 2015.
21. Szlązak J., Szlązak N., Borowski M., Obracaj D.: *Program komputerowy do obliczania rozkładu prędkości powietrza i stężenia metanu w zrobach ścian zawałowych*, Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej, nr 97, Polska Akademia Nauk, Kraków 2006, s. 671.
22. Trenczek S.: *Charakterystyka zagrożeń naturalnych*. W: *Monitorowanie, telemetria i narzędzia informatyczne w górnictwie dla poprawy bezpieczeństwa pracy – wybrane zagadnienia*, red. S. Trenczek, Wydawnictwo ITI EMAG, Katowice 2014, s. 7-29.
23. Trenczek S., Wojtas P.: *Rozwój monitorowania zagrożeń naturalnych w okresie ostatniego 20-lecia*. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, 2014, nr 9, s. 3-10.
24. Ulrey J.P.: *Explosion hazards from methane emissions related to geologic features in coal mines*, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh PA, USA 2008.
25. von Glehn F.H., Ox I.: *Monitoring and control of underground ventilation systems using VUMA network*, Proceedings of the 10th US/North American Mine Ventilation Symposium, Anchorage, Alaska, USA, May 2004.
26. Vigil A.A., Nicieza C.G., Rodriguez M.A., Mendez A.: *Modelization of methane development in vertical coal seam exploited by sublevel stopping method*. "International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment", 1996, No. 10(1), pp.31-40.
27. Wasilewski S.: *Automatic gas measurement*. W: *Innowacje dla gospodarki*, red. S. Trenczek, Wydawnictwo ITI EMAG, Katowice 2010, s. 141-161.
28. Wacławik J., Roszczyński W.: *Aerologia górnicza*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1983.
29. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych*. Dz.U., 2013, poz. 230.

dr inż. ZDZISŁAW KRZYSTANEK

dr inż. JERZY MRÓZ

dr hab. inż. STANISŁAW TRENCZEK

Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

ul. Leopolda 31, 40-189, Katowice

{dzislaw.krzystanek, jerzy.mroz, stanislaw.trenczek}@ibemag.pl