Dr inż. Bogdan GICALA
Mgr inż. Andrzej TUREWICZ
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Metoda numerycznej mechaniki płynów w projektowaniu maszyn i urządzeń górniczych

S t r e s z c z e n i e

W artykule zawarto, przegląd metod modelownia numerycznego przepływów (CFD) jako narzędzia wspomagającego projektowanie maszyn i urządzeń w tym dla górnictwa. Omówienie fizycznych modeli wymiany pędu ciepła i masy zilustrowano przykładami zastosowania obliczeń CFD między innymi w projektowaniu filtrów wodnych, systemu wentylacyjnego wyrobisk kopalnianych oraz układu zraszania kombajnów ścianowych.

S u m m a r y

The short review of computational fluid dynamics techniques for flow simulation as a CAD tool for mining machines and systems development is presented in this chapter. A brief discussion of physical models of momentum, mass and heat transfer is supported by examples of using them in CFD calculations for filters for water cleaning, mine ventilation systems and sprinkle systems of longwall shearer.

1. Wstęp

Numeryczna dynamika płynów (CFD – Computational Fluid Dynamics) jest coraz szerzej stosowaną techniką wspomagania projektowania. Osiągnięcia numerycznej mechaniki płynów i postęp w dziedzinie systemów komputerowych w ostatniej dekadzie umożliwiają coraz głębsze poznanie i zrozumienie natury również przepływów wielofazowych, mających szczególne znaczenie w procesach przemysłowych np. [15, 16, 17, 18, 19]. Modele obliczeniowe możliwe do zastosowania w praktyce inżynierskiej bazują na dwóch różnych podejściach: podejściu Eulera-Lagrange'a, które sprowadza się do śledzenia trajektorii pojedynczych cząstek (lub grup cząstek) poruszających się w polu prędkości fazy ciągłej, jak np: krople cieczy zawieszone w gazie (aerozole), pęcherzyki gazu (napowietrzanie) czy cząstki stałe zawieszone w cieczy lub gazie, oraz podejściu eulerowskim, w którym wszystkie fazy traktowane są, jako wzajemnie przenikające się kontinua.

W niniejszym artykule zawarto jedynie krótki przegląd wybranych, eulerowskich metod modelowania, zaimplementowanych w pakiecie oprogramowania ANSYS FLUENT oraz przykłady ich praktycznego wykorzystania do symulacji zjawisk, których wyniki mogą dostarczać informacji wspomagających projektowanie maszyn i urządzeń górniczych.

Bardziej wyczerpujące omówienie metod modelowania przepływów wielofazowych znajdzie czytelnik np. w pracach [1, 6]. Natomiast w pracy [12] zawarto krótki przegląd modeli fizycznych stosowanych w obliczeniach symulacyjnych przepływów wielofazowych.

2. Równania zachowania masy, pędu i energii dla przepływów turbulentnych

Poniżej, w zwartej formie, przedstawiono fundamentalne równania opisujące jednofazowy turbulentny przepływ płynu. Podstawę opisu ruchu płynu stanowią równania zachowania masy (1), pędu (2) i jeżeli jest modelowana wymiana ciepła, równanie zachowania energii (3).

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v}\right) = S_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{v}\right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v}\vec{v}_q\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\vec{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E\right) + \nabla \cdot \left(\vec{v}\left(\rho E + p\right)\right) = \\ &\nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + \left(\vec{\vec{\tau}} \cdot \vec{v}\right)\right) + S_h \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie:

- $\vec{v}$ - prędkość [m/s],
- ρ - gęstość [kg/m^3],
- S_m - dodatkowe źródło masy, zmienne lub stałe [kg/s]
- p - ciśnienie [Pa],
- $\vec{\vec{\tau}}$ - tensor naprężeń [Pa],
- $\vec{g}$ - przyspieszenie grawitacyjne [m/s^2],
- $\vec{F}$ - wektor sił zewnętrznych [N].
- t - czas [s],
- E - energia całkowita właściwa [J/kg],

p - ciśnienie [Pa],

λ_{eff} - efektywny współczynnik przewodzenia ciepła [W/(mK)],

T - temperatura [K],

h_i - entalpia właściwa i-tego składnika mieszaniny [J/kg],

$\vec{J}_i$ - strumień dyfuzji [kg/(m^{2}s)],

S_h - wolumetryczne źródło ciepła [W/m^3].

W równaniu (3) człony po prawej stronie odnoszą się odpowiednio do wymiany ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji i rozpraszania na skutek tarcia wewnętrznego. λ_{eff} jest sumą współczynnika przewodzenia i turbulentnego przewodzenia ciepła.

Jeżeli modelowany układ jest mieszaniną wielofazową to wówczas składniki po lewej stronie równania (1) są ważone udziałem objętościowym poszczególnych faz. Natomiast człon źródłowy jest uzupełniony o bilans międzyfazowego przepływu masy. Podobnie równania pędu i energii są ważone udziałem objętościowym faz i uzupełnione odpowiednio o człon międzyfazowej wymiany pędu i człon międzyfazowej wymiany ciepła [2, 9].

Cechą charakterystyczną przepływów turbulentnych jest fluktuujące pole prędkości. Ponieważ fluktuacje te są niewielkie i o wysokiej częstości, w praktyce nie jest możliwe ich obliczenie w sposób bezpośredni. Stosuje się, zatem uśrednianie prędkości w czasie i przestrzeni, prowadzące do modyfikacji równania pędu.

Istnieje wiele koncepcji modelowania przepływów turbulentnych. Klasycznym, najczęściej implementowanym w komercyjnych kodach numerycznych modelem turbulencji jest model Harlowa-Nakayamy znany, jako model k-ε [4] Zastosowanie tej koncepcji przekształca równanie Naviera-Stokesa w tzw. uśrednione równanie Naviera-Stokesa, zwane równaniem Reynoldsa, które zawiera dodatkowy człon - tensor naprężeń Reynoldsa.

Wprowadzenie dodatkowego członu, w postaci tensora naprężeń Reynoldsa, do równań Naviera-Stokesa sprawia, że układ przestaje być domknięty. W modelu k-ε domknięcie równań jest realizowane poprzez wprowadzenie dwóch dodatkowych równań różniczkowych transportu: dla energii kinetycznej turbulencji k i szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ε. Dla przepływu jednofazowego równania te przyjmują postać [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho k + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v}k\right) = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + G_k + \rho\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\varepsilon + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v}\varepsilon\right) = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] + \frac{\varepsilon}{k}\left(C_{1\varepsilon}G_k + C_{2\varepsilon}\rho\varepsilon\right) \tag{5}$$

Wielkości $C_{1\varepsilon}$ = 1,44 i $C_{2\varepsilon}$ = 1,92 są stałymi eksperymentalnymi. Wartości turbulentnej liczby Prandtla również zostały określone eksperymentalnie wynoszą σ_k = 1 i σ_ε = 1,3 odpowiednio dla k i ε [10].

Odkąd poznano słabe strony i ograniczenia standardowego modelu k-ε, wprowadzono dwie znaczące modyfikacje w postaci tzw. modelu RNG k-ε [7] oraz modelu „realizable" k-ε [7]. W przedstawionych poniżej przykładach zastosowania CFD wszystkie symulacje wykonano przy założeniu modelu turbulencji „realizable k-ε". Powyższe równania dotyczą turbulentnych przepływów jednofazowych. W przypadku często spotykanych w praktyce inżynierskiej przepływów wielofazowych powyższe równania transportu mogą być rozwiązywane dla mieszaniny faz, z uwzględnieniem oddziaływania faz rozproszonych na turbulencje, w fazie ciągłej lub dla każdej z faz oddzielnie.

3. Analiza przepływu wody przez filtr samoczyszczący ze szczelinowymi wkładami filtracyjnymi

W omawianym przykładzie przedstawiono analizę przepływu jednofazowego, uzupełnionego o model przepływu przez medium porowate. Analiza obejmuje przepływ wody przez filtr samoczyszczący ze szczelinowymi wkładami filtracyjnymi przy zadanych wartościach ciśnienia na wlocie filtra. Analizę wykonano dla dwóch stanów pracy filtra tj.: dla stanu, w którym przepływ przez wszystkie wkłady filtracyjne odbywa się w kierunku współprądowym i dla stanu, w którym jeden z wkładów filtracyjnych jest przepłukiwany w celu usunięcia zanieczyszczeń. Celem obliczeń symulacyjnych było określenie pola prędkości, ciśnienia statycznego i ciśnienia całkowitego rozumianego, jako suma ciśnienia statycznego i dynamicznego wewnątrz elementów składowych filtra oraz wyznaczenie charakterystyki przepływowej filtra tj. natężenia przepływu w funkcji ciśnienia na wlocie filtra.

Dane wejściowe do analizy stanowił trójwymiarowy model geometryczny filtra oraz dane konstrukcyjne i charakterystyka przepływowa szczelinowego wkładu filtracyjnego.

Powierzchnia filtracyjna jest traktowana jak medium porowate, o znanych oporach przepływu. Takie przybliżenie wymaga wprowadzenia do równania pędu (2) dodatkowego członu źródłowego S_i.

Dla homogenicznego medium porowatego z jakim mamy to czynienia w tym przypadku, równanie członu źródłowego przyjmuje postać [6]:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + C_2\frac{1}{2}\rho|v|v\right) \quad (6)$$

gdzie:

α –podatność,

C_2 – współczynnikiem oporu bezwładnościowego.

Straty pędu, wyrażone wzorem (6), generują w elemencie zdefiniowanym, jako medium porowate, gradient ciśnienia proporcjonalny do prędkości lub do kwadratu prędkości w elemencie płynu. Ponieważ grubość membrany filtracyjnej jest stosunkowo niewielka, możliwe jest dalsze uproszczenie modelu do przypadku jednowymiarowego. Wówczas, dla cienkiego medium porowatego o skończonej grubości Δn [m], spadek ciśnienia Δp [Pa] jest zdefiniowany jako [6]:

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + C_2\frac{1}{2}\rho v^2\right)\Delta n \quad (7)$$

gdzie:

α – podatność membrany,

v – prędkość normalna do powierzchni membrany [m/s].

Znając wyznaczoną doświadczalnie charakterystykę przepływową membrany można wyznaczyć wartości współczynników α i C_2.

Na potrzeby analizy CFD opracowano dwa modele geometryczne tj.: dla normalnej pracy filtra i dla funkcji przepłukiwania. W obliczeniach założono, że przepływ przez filtr jest wymuszany przez stałą wartość ciśnienia na wlocie. Symulacje wykonano dla czterech wartości ciśnienia na wlocie filtra tj. dla 1, 2, 3 i 4 MPa, dla filtra w stanie normalnej pracy i podczas funkcji oczyszczania wkładów filtracyjnych. Wyniki obliczeń dla stanu ustalonego przedstawiono w postaci wykresów konturowych, w wybranych płaszczyznach przekroju filtra, dla ciśnienia oraz prędkości. Poniżej, na rysunku 1, zaprezentowano przykładowe wykresy konturowe rozkładu prędkości i ciśnienia statycznego dla ciśnienia 4 MPa, na wlocie filtra.

Na podstawie obliczeń symulacyjnych wyznaczono natężenia przepływu wody przez poszczególne wkłady filtracyjne oraz na wylocie filtra, dla obydwu stanów pracy, a następnie sporządzono charakterystyki przepływowe dla poszczególnych wkładów filtracyjnych. Wyniki obliczeń wykorzystano w procesie projektowania filtra.

4. Symulacja numeryczna rozkładu stężeń gazów spalinowych w wyrobisku kopalnianym podczas ruchu kolejki podwieszanej z silnikiem Diesla

Kolejnym problemem jest określenie stężenia gazów w słabo przewietrzanych wyrobiskach, w których odbywa się ruch kolejek z napędem spalinowym. W tym przypadku podjęto próbę zastosowania metody obliczeniowej do symulacji rozkładu stężenia gazów spalinowych podczas transportu ludzi kolejką podwieszoną z silnikiem Diesla. Jako przykładowy obszar przepływu wybrano skrzyżowanie dwóch chodników pod kątem prostym. Celem pracy była analiza możliwości, jak i problemów związanych z wyznaczaniem na drodze teoretycznej rozkładów prędkości przepływu powietrza i spalin, oraz stężeń poszczególnych składników gazów spalinowych, ze szczególnym uwzględnieniem tlenku i dwutlenku węgla. Analizę przeprowadzono dla stanu nieustalonego.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony, trójwymiarowy model geometryczny analizowanego fragmentu wyrobiska i kolejki oraz model kabiny operatora i ławy do transportu ludzi.

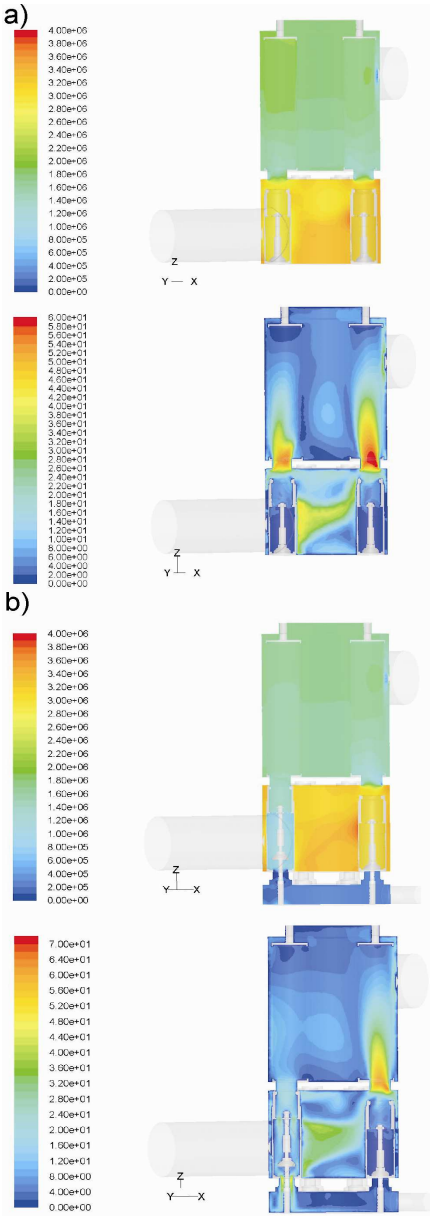
Założono, że mieszanina powietrze-spaliny jest gazem doskonałym i ściśliwym. Przyjęto, że powietrze świeże jest trójskładnikową mieszaniną azotu, tlenu i dwutlenku węgla, a spaliny mieszaniną azotu, tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla. Rozważany problem opisano układem równań ciągłości, równaniami modelu turbulencji „ralizable k-ε" oraz dodatkowymi równaniami transportu wielkości skalarnych tj. udziałów masowych tlenu, tlenku i dwutlenku węgla. Obliczenia przeprowadzono w przestrzeni 3D, dla stanu nieustalonego, przy zastosowaniu siatki dynamicznej, dla przedziału czasu od 0 do 200 s. Zastosowano stały krok czasowy 0,1 s.

Dopływ świeżego powietrza do wyrobiska zdefiniowano poprzez podanie prędkości powietrza na wlocie, w kierunku normalnym do powierzchni wlotu, parametrów turbulencji k i ε oraz udziału masowego tlenu, tlenku i dwutlenku węgla. Wielkości te przyjęto jako stałe. Emisję spalin modelowano jako strumień masy o stałym natężeniu, parametrach k i ε oraz składzie chemicznym. Odpływ mieszaniny powietrza i spalin zdefiniowano, jako wypływ swobodny.

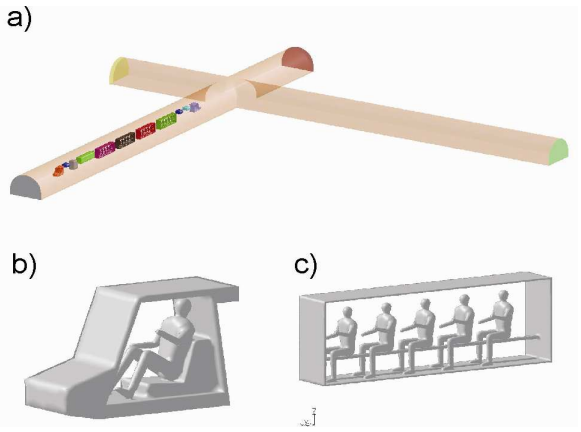
Jako warunek początkowy do obliczeń dynamicznych przyjęto rozkład prędkości i stężeń dla stanu ustalonego, obliczony przy założeniu, że prędkość kolejki znajdującej się w położeniu początkowym, odpowiadającym chwili t = 0 s i przy warunkach brzegowych zdefiniowanych jak wyżej wynosi 0.

Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów konturowych, dla pola skalarnego udziału objętościowego poszczególnych składników mieszaniny gazów oraz wykresów konturowych i wektorowych dla pola prędkości. Zmiany pól skalarnych i wektorowych w czasie ruchu kolejki przedstawiono w postaci animacji w formacie MP4 lub AVI.

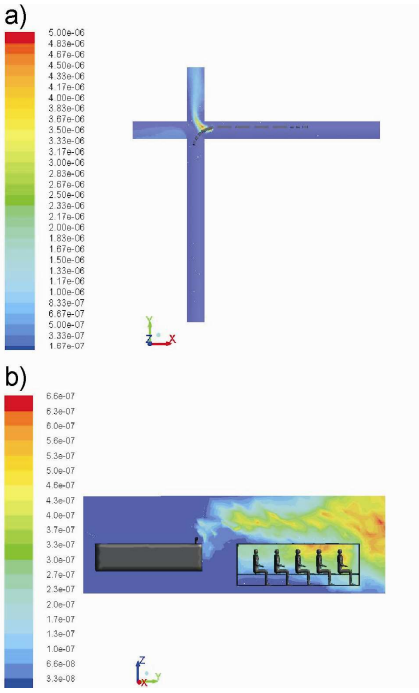
Przykładowe wykresy konturowe rozkładu udziału objętościowego tlenku węgla przedstawiono na rysunku 3.



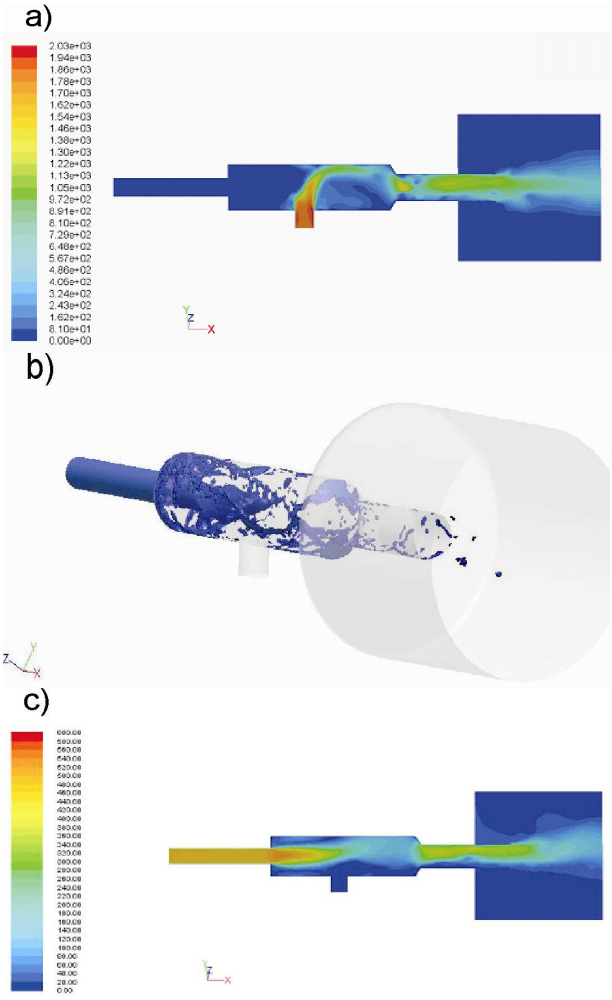
Rys.1. Wykres konturowy ciśnienia statycznego (u góry) i prędkości (u dołu) w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez osie wkładów filtracyjnych dla normalnej pracy filtra *a) i dla stanu przepłukiwania jednego z filtrów b) p = 4 MPa*



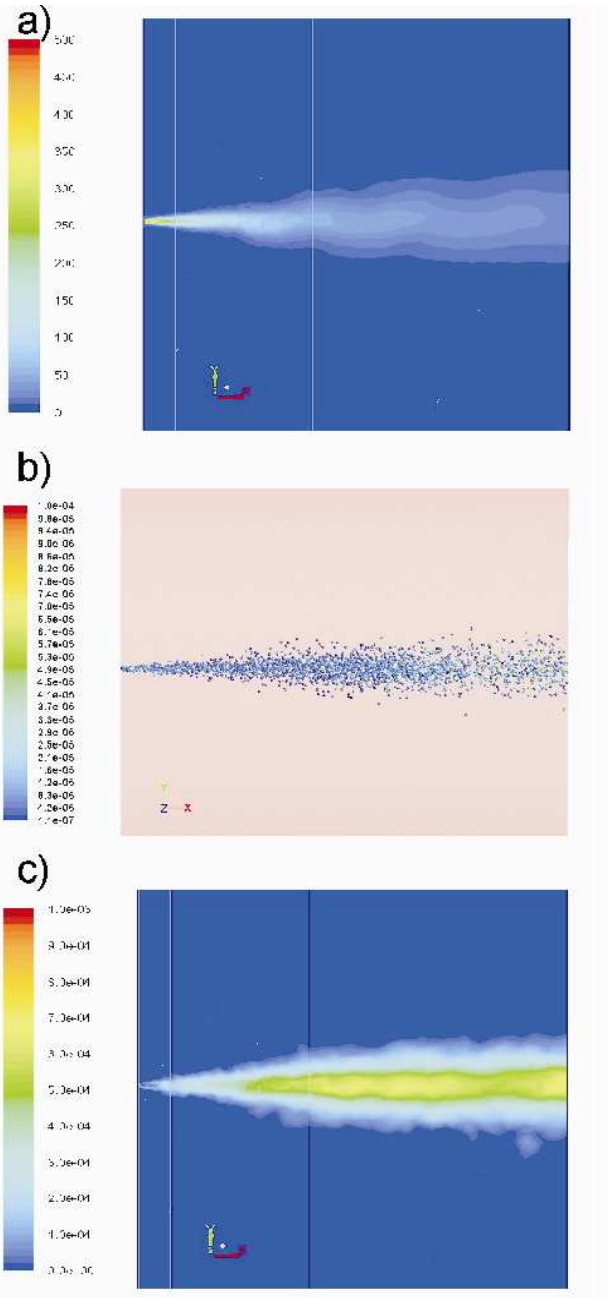
Rys.2 *a) Model geometryczny analizowanego fragmentu wyrobiska, b) kabina operatora kolejki, c) ława do przewozu ludzi* [15]

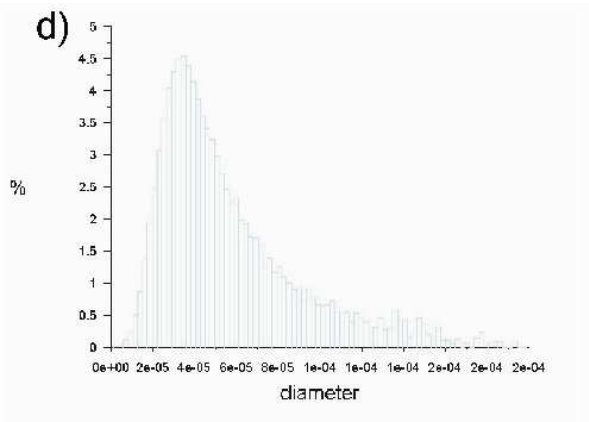


Rys.3. Rozkład udziału objętościowego tlenku węgla w przekroju wyrobiska *a) na wysokości twarzy przewożonych ludzi w przykładowej fazie ruchu fazach ruchu tj. dla t = 135 s, b) dla ławy znajdującej się bezpośrednio za jednostką napędową zestawu transportowego* [15]



Rys.4. Wykres konturowy prędkości mieszaniny w płaszczyźnie przechodzącej przez oś wlotu poprzecznego i oś dyszy *a) i izopowierzchnia dla udziału objętościowego wody równego α = 1 b) dla zasilania powietrzem prostopadle do osi dyszy. Te same wykresy dla zasilania powietrzem równolegle do osi dyszy odpowiednio rysunki c) i d)*. Prędkość wyrażono w m/s [16]





Rys.5. Wykres konturowy pola prędkości fazy nośnej w płaszczyźnie przechodzącej przez oś symetrii dyszy *a) trajektorie cząstek aerozolu b), wykres konturowy rozkładu średnic kropel, c) i histogram rozkładu średnic kropel w odległości 0,21m od wylotu dyszy d).* Skale barwne wyrażają prędkość w m/s i średnicę kropel w m [16]

5. Symulacja powstawania aerozolu powietrzno-wodnego w dyszy dwuczynnikowej

Do wirtualnego prototypowania maszyny wydobywczej, do zwalczania zapylenia w obszarze urabiania, przewidziano instalację zraszającą wyposażoną w dwuczynnikowe dysze zraszające powietrzno-wodne [10, 11]. Cechą charakterystyczną zastosowanych dysz są wzajemnie, prostopadłe kierunki strumieni zasilających powietrza i wody. Sposób rozprzestrzeniania się strugi powietrzno-wodnej modelowano przy użyciu metod numerycznej mechaniki płynów. Zadanie podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap zadania, stanowiły obliczenia symulacyjne dla dwóch „modeli lokalnych" tj. dla modelu obejmującego przepływ powietrza wewnątrz dyszy dwuczynnikowej oraz modelu obejmującego przepływ wewnątrz dyszy i w przestrzeni wokół wylotu dyszy. Obliczenia dla przepływu wewnątrz dyszy przeprowadzono wykorzystując model Volume of Fluid (VOF), zaimplementowany w programie Ansys Fluent [3]. W modelu tym rozwiązywane są pojedyncze równania zachowania pędu i masy, dla dwóch nie mieszających się płynów, (w tym przypadku powietrza i wody) oraz śledzona jest powierzchnia międzyfazowa pomiędzy fazami układu, w całej domenie obliczeniowej. Wartości składowych pól skalarnych i wektorowych, a także własności fizyczne mieszaniny dla danego elementu objętościowego są średnimi ważonymi udziałem objętościowym poszczególnych faz. Śledzenie powierzchni międzyfazowej jest realizowane poprzez rozwiązanie równania transportu dla udziału objętościowego fazy (faz) [3].

Do śledzenia powierzchni międzyfazowej zastosowano metodę geometrycznej rekonstrukcji (geo-reconstruct) [3]. Metoda polega na tym, że w elementach objętościowych, w których udział objętościowy którejkolwiek z faz wynosi 1, dla równania udziału objęto-

ściowego, stosowane są standardowe metody dyskretyzacji. Jednak, gdy element objętościowy leży na granicy faz, stosowana jest metoda geo-reconstuct. Schemat dyskretyzacji geo-reconstruct zakłada, że powierzchnia międzyfazowa w pojedynczym elemencie objętościowym jest powierzchnią płaską tzn. że do obliczenia adwekcji płynu wewnątrz elementu objętościowego może być zastosowane równanie liniowe. Schemat ten daje kształt powierzchni międzyfazowej, najbardziej zbliżony do rzeczywistego.

Obliczenia przeprowadzono dla stanu nieustalonego. Zastosowano krok czasowy $\Delta t = 10^{-6}$ s. Wyniki przedstawiono w formie wykresów konturowych ilustrujących izolinie wartości bezwzględnej prędkości średniej mieszaniny, wykresów wektorowych ilustrujących strukturę przepływu, wykresów konturowych dla udziału objętościowego faz i wykresów izometrycznych izopowierzchni $\alpha_w = 0{,}99$ ilustrujących topologię przepływu. Dynamikę przepływu zilustrowano za pomocą animacji komputerowych wyżej wymienionych wykresów, w czasie od t = 0 do momentu zakończenia obliczeń. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4.

We wszystkich symulacjach, niezależnie od kierunku podawania powietrza, zaobserwowano podobne topologie przepływu. Rozpad strumienia wody następuje w komorze mieszania. Nie zaobserwowano tworzenia się stabilnego filmu wodnego na ściankach części wylotowej dyszy.

Na podstawie wyników obliczeń przepływu wewnątrz dyszy powietrzno-wodnej, takich jak: profile prędkości wody i powietrza u wylotu dyszy, kąty rozpraszania cząstek wody, przeprowadzono obliczenia symulacyjne rozprzestrzeniania się aerozolu w przestrzeni wokół dyszy. W wyniku obliczeń uzyskano teoretyczne rozkłady prędkości i średnic kropel w zależności od odległości od wylotu dyszy. Model geometryczny wylotu dyszy i przestrzeni wokół niej zamodelowano w postaci walca.

Obliczenia propagacji cząstek aerozolu przeprowadzono w przestrzeni trójwymiarowej wykorzystując model Eulera-Lagrange'a. W podejściu Eulera_Lagrange'a faza ciągła (nośna), którą w omawianym przypadku jest powietrze, stanowi kontinuum, dla którego rozwiązywane jest uśrednione równanie Naviera-Stokesa tzw. równanie Reynoldsa. Turbulencje w fazie ciągłej obliczano przy zastosowaniu modelu realizable k-ε. Dla kropel wody wyrzucanych z dyszy powietrzno-wodnej obliczane są trajektorie ruchu [6].

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów konturowych rozkładu prędkości fazy nośnej i kropel wody, rozkładu gęstości cząstek wyrażonej w liczbie cząstek w 1 m^3 powietrza, rozkładu liczby zderzeń cząstek, udziału objętościowego cząstek oraz rozkładu średnic cząstek w wybranych przekrojach strugi. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wykresy ilustrujące otrzymane wyniki.

Na podstawie obliczeń określono czynniki determinujące postać rozkładu średnic kropel. Stwierdzono, że w bezpośrednim sąsiedztwie wylotu dyszy następuje gwałtowne zwiększenie liczby kropel i zmniejszenie średnicy Sautera. Duża gęstość zderzeń, przy jednoczesnym zmniejszeniu średnicy Sautera, wskazuje, że dominującym mechanizmem zderzenia kropel jest ich rozpad. Koalescencja jest zjawiskiem mniej istotnym.

Głównym czynnikiem determinującym rozkład kropel aerozolu będzie prędkość fazy nośnej, a co się z tym wiąże ciśnienie zasilania dyszy powietrzem. Ilość podawanej wody ma wpływ na grubość filmu olejowego wewnątrz dyszy, a co za tym idzie średnicę kropel opuszczających dyszę. Na podstawie histogramów rozkładu średnic kropel zaobserwowano, że w miarę oddalania od wylotu dyszy średnica Sautera kropel maleje nieznacznie, co oznacza, że w dużej odległości od dyszy krople poruszają się względem siebie z niewielkimi prędkościami względnymi i zjawiska koalescencji i czy też rozpadu zachodzą w niewielkim stopniu. Formowanie rozkładu kropel aerozolu następuje w omawianym przypadku w odległości nie przekraczającej kilkunastu średnic wylotowych dyszy.

6. Podsumowanie

Symulacje komputerowe przy użyciu metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) stanowią jeden z etapów projektowania. Ich celem jest najczęściej optymalizacja procesu technologicznego oraz analiza zagadnień związanych z bezpieczeństwem i ochroną środowiska. Wymusza to odpowiedni poziom dokładności wyników obliczeń. Ograniczenie stanowić mogą wymagane zasoby sprzętowe oraz czas przeprowadzenia obliczeń. Porównując stan wiedzy dotyczącej przepływów jednofazowych i wielofazowych, można stwierdzić, że metody symulacji przepływów wielofazowych w dalszym ciągu wymagają doskonalenia. Zasadniczym utrudnieniem jest tutaj mnogość i różnorodność zjawisk fizycznych obecnych w tego rodzaju przepływach, dająca w wielu przypadkach zaskakujące i istotne z praktycznego punktu widzenia efekty. Z tych też powodów stosuje się różne podejścia, stosownie do typu modelowanego przepływu i występujących zjawisk.

Ze względu na łatwość zastosowania do złożonych geometrii, szerokiego zakresu liczb Reynoldsa, oraz dużej liczby modelowanych cząstek, podejście typu Euler-Euler jest najpowszechniej stosowane w praktyce inżynierskiej. Alternatywna metoda Euler-Lagrange RANS jest jednak łatwiejsza w zastosowaniu, w przypadkach wymagających sformułowania złożonych warunków brzegowych (np. ścianki o dużej chropowatości), w przepływach polidyspersyjnych, czy przepływach z koalescencją i rozpadem fazy rozproszonej.

Poza wyborem właściwego podejścia, kluczowym elementem, mającym wpływ na dokładność otrzyma-

nych wyników, jest trafność przyjętych modeli matematycznych zachodzących zjawisk fizycznych. Główną słabością modelu Euler-Euler RANS jest w dalszym ciągu, mimo licznych badań, model oddziaływania wzajemnego turbulencji i cząstek, model oddziaływań pomiędzy cząstkami oraz model wielofazowej warstwy przyściennej. Metody dokładniejsze, lecz znacznie bardziej kosztowne numerycznie, jak DNS (Direct Numerical Simulation) i LES (Large Eddy Simulation), są praktycznie nieprzydatne do zastosowań inżynierskich, odgrywają jednak znaczącą rolę w doskonaleniu modeli matematycznych zjawisk wielofazowych. Obliczenia metodą DNS/LES wymagają weryfikacji eksperymentalnej, często trudnej do realizacji ze względu na konieczność wyizolowania tylko określonych zjawisk. Wydaje się zatem, że metoda Euler-Euler RANS na długo pozostanie najszerzej stosowaną w praktyce inżynierskiej metodą symulacji przepływów wielofazowych.

Prace, których wyniki przedstawiono w rozdziałach 3 i 5 zostały wykonane w ramach projektu INERG: Innowacyjne rozwiązania maszyn wydobywczych podnoszące bezpieczeństwo energetyczne kraju. Nr ZPB/5/64812/IT2/10.

Praca, której wyniki przedstawiono w rozdziale 4 została wykonana w ramach projektu MINTOS (fundusz RFCS): Improving Mining Transport Reliability. Podniesienie niezawodności transportu kopalnianego.

Literatura

1. Amsden A.A., Harlow F.H.: A Simplified MAC Technique for Incompressible Fluid Flow Calculations, Journal of Computational Physics 6 (1970) 322-325.
2. Brennen Ch.E.: Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge University Press, (2005).
3. Chorin A. J.: Numerical solution of navier-stokes equations. Mathematics of Computation, 22, (1968), 745–762.
4. Nguyen C.M., Nguyen A.V.: Computational Validation And Extension Of The Generalised Sutherland Equation For Bubble-Particle Encounter Efficiency In Flotation, Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13-15 December 2006.
5. Drew D., Lahey R.T.Jr.: Application of general constitutive principles to the derivation of multidimensional two phase flow equations, Int. J. Multiphase Flow 7, (1979), 243-264.
6. FLUENT 12 Theory Guide, ANSYS Incorporated, (2009).
7. Harlow F.H., Nakayama P.I.: Transport of turbulence energy decay rate. University of California (1968), Rep. LA-3854.
8. INERG: Innowacyjne rozwiązania maszyn wydobywczych podnoszące bezpieczeństwo energetyczne kraju. Nr ZPB/5/64812/IT2/10.
9. Jakobsen H.A.: Chemical Reactor Modeling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008), rozdz.3 Multiphase Flow.
10. Launder B. E. and Spalding D. B.: Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, (1972).
11. MINTOS (fundusz RFCS): Improving Mining Transport Reliability. Podniesienie niezawodności transportu kopalnianego.
12. Murthy B.N., Ghadge, R.S. Joshi J.B.: CFD simulations of gas–liquid–solid stirred reactor: prediction of critical impeller speed for solid suspension. Chemical Engineering Science 62, (2007), 7184–7195.
13. Murthy B.N., Ghadge, R.S. Joshi J.B.: CFD simulations of gas–liquid–solid stirred reactor: prediction of critical impeller speed for solid suspension. Chemical Engineering Science 62, (2007), 7184–7195.
14. P.T.L. Koh, M.P.T. Schwarz, Y. Zhu, P. Bourke, R. Peaker, J.P.: Franzidis, Developent of CFD Model sof Mineral Flotation Cells, Therd International Conference in the Minerals and Process Industries, CISRO, Melbourne, Australia 10-12 December 2003.
15. Prostański D., Bałaga D., Rojek P., Siedlaczek J.: Wyniki badań stanowiskowych instalacji powietrzno-wodnej zastosowanej w kombajnie ścianowym KSW-1140EZ. Przegląd górniczy nr 3-4/2010.
16. Prostański D.: Koncepcja metody ograniczania zapylenia w wyrobiskach korytarzowych kopalń. Referat wysłany na konferencję naukowo-techniczną Techniki Urabiania 2011. Kraków-Krynica 2011.
17. Ren T., Balusu R.: The use of CDF modelling as a tool for solving mining health and safety problems, 10th Underground Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2010, 339-349.
18. Tratnig A., Brenn G.: Drop size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers, International Journal of Multiphase Flow 36 (2010) 349–363.
19. Xiang R.B., Lee K.W.: Numerical study of flow field in cyclones of different height, Chemical Engineering and Processing 44 (2005) 877–883.
20. Zhou L.X.: Two-Fluid Models for Simulating Dispersed Multiphase Flows-A Review, Journal of Computational Multiphase Flows, 1, 1, (2009).

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Dr inż. Krzysztof STANKIEWICZ
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Metoda samoorganizacji roju w monitorowaniu i sterowaniu urządzeń w warunkach wyrobisk podziemnych

S t r e s z c z e n i e

Najbardziej oczekiwanymi cechami współczesnych systemów sterowania i monitoringu są: prostota instalacji, programowania i serwisu, niski koszt i wysoka niezawodność, elastyczność i wszechstronność zastosowań oraz zgodność z wymaganymi standardami norm europejskich. Oczekiwania te znajdują też swój wyraz w celach nakreślonych w programach badawczych Unii Europejskiej – jeden z celów zawartych w 7 Programie Ramowym zakłada rozwój systemów adaptacyjnych, samoorganizujących się i dopasowujących się do zmiennych warunków środowiska i wymagań użytkowników (cel ICT-2007.8.2) [1]. Realizacja powyższych celów możliwa jest z użyciem metody samoorganizacji roju oraz wybranych technik programowania. Opracowana w toku zadań metoda pozwoli na zaimplementowanie nowoczesnej i wydajnej techniki monitoringu oraz sterowania w wybranych urządzeniach i procesach technologicznych górnictwa podziemnego.

S u m m a r y

The following features are most expected in state-of-the-art control and monitoring systems: easy installation, programming and servicing as well as low cost, high reliability, versatility of use and conformity with the requirements of European Standards. These expectations are reflected in European research projects – one of 7th Framework Programme objectives assumes development of adaptive systems, which can organize by themselves and can adapt to changing environment and changing requirements of users (objective: ICT-2007.8.2). Realization of the above mentioned objective is possible with use of the method of cluster self-organization as well as with selected programming technology. The method developed during tasks realization will enable implementation of state-of-the-art and effective monitoring and control technology in selected machines and devices used in underground mining industry.

1. Wstęp

Metody i techniki sztucznej inteligencji stosowane do rozwiązywania problemów związanych z eksploatacją złóż węgla skupiają się głównie wokół systemów sterowania i diagnostyki maszyn [9, 10]. W praktyce inżynierskiej od dawna napotyka się trudności związane z opisem układów złożonych, wieloelementowych, w których wymagana jest wzajemna i sprawna interakcja pojedynczych komórek (nazywanych agentami, aktorami), czyli jednostek tworzących spójny system, działający z określoną autonomią tak, aby osiągnąć założone cele (ilościowe lub jakościowe). W 1987 r. na konferencji SIGGRAPH programista Craig Reynolds, w artykule *„Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”* zaproponował trzy podstawowe zasady samoorganizacji bazujące na obserwacjach grup zwierząt, mianowicie:

- rozdzielność – sterowanie zapobiegające lokalnym zgrupowaniom jednostek. Rozdzielność umożliwia jednostce utrzymanie pożądanej minimalnej separacji efektów specyficznych dla jego funkcji w stosunku do innych jednostek z grupy lokalnej, a tym samym zapobiega kumulowaniu struktur sprzętowych lub decyzyjnych. Z drugiej strony, zastosowanie samej rozdzielności spowodowałoby strukturalne rozbicie grupy, bez możliwości ponownego skupienia. Stąd wynika potrzeba wprowadzenia przeciwnej reguły spójności;
- spójność – sterowanie w kierunku uśrednionego działania lokalnej grupy jednostek. Spójność umożliwia jednostce grupowanie z innymi jednostkami lokalnymi, czyli zapobiega dekompozycji struktur. Jednak nawet wprowadzenie tej zasady nie jest wystarczające. Ciągle może występować niepożądany efekt nieskoordynowanego działania jednostek, spowodowany brakiem wspólnego kierunku. Zachodzi więc potrzeba dodania zasady wyrównania;
- wyrównywanie – sterowanie w kierunku uśrednionego celu lokalnej grupy. Wyrównywanie zapewnia jednostce możliwość dostosowania swojego działania do innych jednostek z jego lokalnej grupy. Zapobiega to niestabilności systemu, którą można opisać jako: „muszę być jak najbardziej zbieżny z działaniem X lecz jednocześnie, gdy to mi się uda, muszę prowadzić działania rozbieżne z X”. W takiej sytuacji otrzymuje się system niestabilny. Rozwiązaniem jest wprowadzenie wyrównywania, które nakazuje jednostkom naśladować kierunek działania sąsiadów oraz jednocześnie spełniać wymagania spójności i rozdzielności.

Dzięki takiemu podejściu udało się sprawnie modelować złożone procesy zachodzące w układach wieloelementowych na poziomie sterowania, komunikacji lub procesu. W celu opracowania i implementacji systemów samoorganizujących się często stosowana jest

metoda bazująca na zachowaniach roju oraz wybrane techniki programowania, np. technika programowania agentowego, dzięki czemu uzyskuje się możliwości budowy systemu złożonego z dowolnej liczby komórek dowolnego typu w dowolnej topologii oraz nielimitowanego dostępu wszystkich komórek do wszystkich zasobów roju (poprzez współdzielenie energii i danych dostępnych w systemie). W efekcie system taki charakteryzuje się unikalnymi właściwościami - proste w konstrukcji komórki, po połączeniu w system roju, automatycznie organizują się w spójny funkcjonalnie organizm o możliwościach rosnących wraz z jego skalą. Architektura roju zapewnia łatwość i szybkość budowy oraz modyfikacji systemu w dowolnej skali, elastyczność, a także wysoki poziom bezpieczeństwa [6, 7].

2. Architektura systemowa

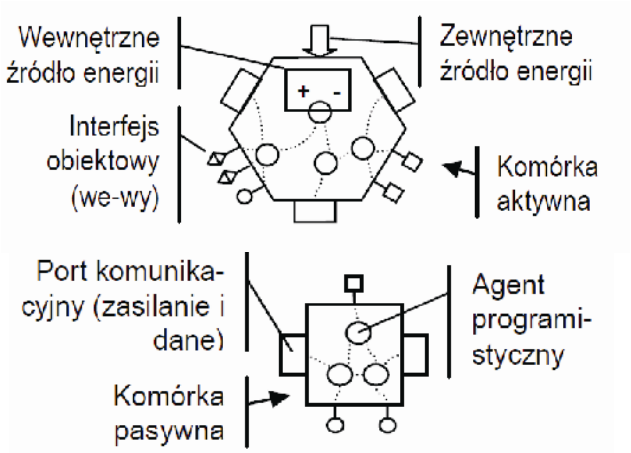
W wyniku poszukiwania odpowiedniej architektury systemowej w odniesieniu do elektronicznych systemów monitoringu i sterowania zwrócono uwagę na interesujące wyniki aplikacyjne architektur wywodzących się z badań nad sztuczną inteligencją [3, 4, 5]. Podstawowym elementem systemu roju jest jednostka (komórka) – autonomiczny moduł o funkcjonalności określonej przez:

- liczbę łącz do innych jednostek,
- typ i liczbę zasobów wewnętrznych (linie wejścia, wyjścia, itp.),
- obecność lub brak wewnętrznego źródła energii,
- zespół agentów programistycznych zainstalowany w jednostce.

Liczba typów komórek stosowana do budowy rojów nie jest określona. Każda komórka może być połączona z dowolną inną, w dowolnej konfiguracji. Komórki łączą się prostymi, zunifikowanymi łączami, poprzez które współdzielą energię zasilania w roju oraz informację. Nie ma ograniczenia liczby i typów komórek uczestniczących w roju – zależy to wyłącznie od potrzeb aplikacji (rys. 1). System roju może się składać z jednej komórki, kilkunastu lub dziesiątek różnych komórek połączonych w dowolny, ale adekwatny w odniesieniu do danej aplikacji, sposób.

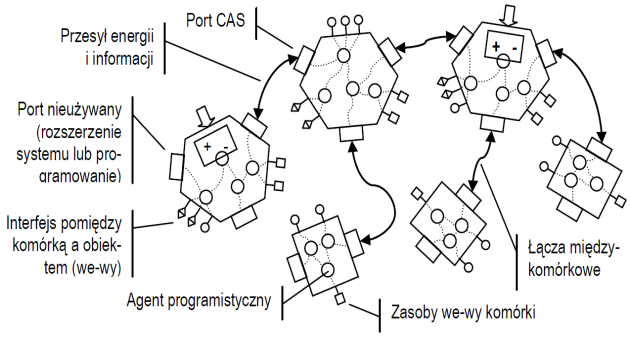
Programowanie agentowe to kolejny poziom abstrakcji programowania, wyższy od abstrakcji programowania obiektowego. Agent programistyczny charakteryzuje się:

- autonomicznością (zdolnością podejmowania decyzji),
- komunikatywnością (umiejętnością komunikacji z innymi agentami),
- percepcją (zdolnością do postrzegania i reagowania na zmiany środowiska),
- mobilnością (umiejętnością przemieszczania się z jednej komórki do drugiej).



Rys.1. Przykładowe modele komórek roju programowane agentowo [2]

Aby w pełni wykorzystać właściwości agentów są oni łączeni w zespoły nazywane MAS (ang. Multi Agents System). Na rysunku 2 przedstawiono model systemu roju z podstawowymi elementami składowymi. Poszczególne komórki mogą łączyć się ze sobą poprzez porty CAS (ang. Communication-And-Supply) przenoszące energię zasilania systemu oraz informacje [8].



Rys.2. Model systemu roju z programowaniem agentowym [2]

Każda komórka stanowi moduł autonomiczny, tzn. może realizować samodzielne zadania. Komórki wyposażane są w zestawy agentów niezbędne do samodzielnej pracy. Konstrukcje poszczególnych komórek są optymalizowane pod względem kosztów – są one wyposażane tylko w zasoby i procesory niezbędne do pracy danej komórki. Jednocześnie technika agentowa pozwala na płyną współpracę komórek przy wzroście skali systemu. Zapewnia to liniową skalowalność systemu i wzrost jego możliwości adekwatnie do skali systemu. Każdy agent jest też obiektem autonomicznym pracującym w systemie czasu rzeczywistego i w trybie wielozadaniowym. Z chwilą połączenia komórek w rój, agenci z poszczególnych komórek zaczynają współpracować ze sobą. Rój staje się w ten sposób wieloprocesorowym systemem wielozadaniowym. Liczba zaangażowanych procesorów i współpracujących agentów rośnie liniowo wraz ze skalą systemu, zwiększając możliwości przetwarzania danych i realizacji zadań.

3. Monitorowanie i sterowanie urządzeń pracujących w wyrobiskach podziemnych z zastosowaniem metody samoorganizacji

W wyniku wstępnej analizy stanu wiedzy o charakterze aplikacyjnym [2, 3, 4, 6, 7, 8], potrzeb rynku i trendów rozwojowych polityki unijnej opisanych w 7 Programie Ramowym zakładającym rozwój systemów adaptacyjnych, samoorganizujących się i dopasowujących się do zmiennych warunków środowiska i wymagań użytkowników, wyróżniono szereg obszarów badawczych, które charakteryzują się największym potencjałem implementacyjnym w warunkach wyrobisk podziemnych, w tym w górnictwie.

Powracającym problemem jest zagrożenie pożarowe na drogach transportowych wyposażonych w przenośniki taśmowe. Krążniki przenośników nie są monitorowane w sposób ciągły, a każdy z nich stanowi potencjalne źródło zapłonu w sytuacji awaryjnej. Ze względu na ich liczbę samoorganizujący się system monitorowania umożliwi pełną, wymaganą diagnostykę pracy krążników w czasie rzeczywistym i w sposób niezawodny. Dzięki wydzieleniu ról agentów (i ich liczby) w systemie nie będzie konieczne ustanawianie redundancji. Sam system tworzy grupę wewnętrznie multi-redundantną na kilku poziomach działania (sprzętowym, programowym, algorytmicznym). W toku dalszych prac zostanie zaproponowana metoda, na podstawie której powstanie technika będąca przedmiotem implementacji w strukturze proponowanego systemu o cechach samoorganizującego się roju. Charakterystyczne dla tego systemu będą rozwiązania komunikujące i zasilające agentów powiązanych z każdym z krążników.

Kolejne pole badawcze jest powiązane tematycznie z problemami dotyczącymi sterowania przebiegiem procesów technologicznych i maszyn przy minimalnym udziale ludzi. Koordynacja działań, określanie celów bieżących, hierarchizacja funkcji w zrobotyzowanych systemach wydobywczych stanie się niebawem koniecznością. Obecnie prowadzi się szeroko zakrojone działania mające na celu jedynie ograniczoną automatyzację działania systemów. W wyniku tych działań otrzymywane są ogromne ilości danych, których ludzka percepcja nie jest w stanie ogarnąć i przeprowadzić złożonego procesu wnioskowania. Nawet jeśli wnioskowanie jest możliwe to staje się ono nieefektywne. W związku z tym metody i techniki sztucznej inteligencji, bazujące na wiedzy i samoorganizacji (także adaptacji) powinny zostać zaimplementowane w celu umożliwienia dalszego rozwoju technologii eksploatacyjnych w górnictwie. Również prowadzenie akcji ratowniczych z udziałem robotów synergicznie współdziałających w celu realizacji określonego celu (poszukiwania ofiar, ustanowienia komunikacji, dostarczania podstawowych dóbr, separacji zagrożeń, itd.) zostało już zapoczątkowane w implementacjach powierzchniowych. Odpowiednio przystosowane urządzenia i algorytmy trafią także do ratowników górniczych. Jednym z ważniejszych zadań, związanych z bezpieczeństwem w kopalniach, jest monitoring ludzi i środków transportu oraz monitoring środowiskowy. Obecne systemy są podatne na manipulację, co niejednokrotnie doprowadza do poważnych wypadków. Nietrudno przewidzieć, że samoorganizujący się system, z niezależnym źródłem zasilania, wprowadzający wewnętrzną diagnostykę i redundancję zapewni zdecydowanie wyższy poziom bezpieczeństwa i dostarczy informacji zweryfikowanych w czasie rzeczywistym.

Wszystkie z opisanych potencjalnych obszarów implementacyjnych są ważne i zastosowanie w nich metod i technik związanych z inteligencją roju może istotnie podnosić bezpieczeństwo pracy oraz zwiększać niezawodność systemów i trafność podejmowanych decyzji. Najbardziej bliskim wdrożenia rozwiązaniem będzie monitorowanie krążników przenośników taśmowych z wykorzystaniem systemu o strukturze roju. Rozwiązanie to jest przedmiotem prac badawczych prowadzonych w ITG KOMAG.

4. Podsumowanie

Opracowana w toku prac metoda samoorganizacji pozwoli na zaimplementowanie nowoczesnej i wydajnej techniki monitoringu oraz sterowania w wyrobiskach podziemnych, szczególnie w odniesieniu do:

- diagnostyki, monitoringu i zabezpieczenia ppoż. przenośników (krążniki i bębny napędowe mogą być traktowane jak elementy roju pomiarowego),
- zrobotyzowanych i autonomicznych urządzeń umożliwiających:
  - wydobywanie surowców w skrajnie trudnych warunkach, w których praca ludzi jest obarczona bardzo dużym ryzykiem w odniesieniu do ich zdrowia i życia,
  - prowadzenie akcji ratowniczych z wykorzystaniem roju mikrorobotów do poszukiwania ofiar, przekazywania energii i komunikacji z poszkodowanymi (wyniki projektów wykazują minimalną przydatność pojedynczych, ciężkich robotów do wspomagania akcji ratowniczych w wyrobiskach podziemnych),
  - monitoring środowiska,
  - monitoring kondycji i ruchu ludzi,
  - monitoring środków transportu,
- inteligentnej komunikacji.

Opracowana metoda powinna umożliwić implementację wybranych rozwiązań sterowania i monitoringu, istotnie zwiększyć niezawodność systemów oraz podnieść bezpieczeństwo pracy ludzi.

Literatura

1. European Commission, ICT - Information And Communication Technologies Work Programme 2007-2008, Objective IST-2007.8.2, str. 58-59
2. Tlaga J., Tlaga W.: Samoorganizujący się system roju – nowe podejście w projektowaniu systemów zabezpieczeń (cz. 1), Ochrona Mienia i Informacji, nr 6/2007, str. 38-42
3. Lieberman H, Selker T.: Agents for the User Interface, Handbook of Agent Technology, Jeffrey Bradshaw, ed., MIT Press, 2003
4. Minar N., Gray M., Roup O., Krikorian R., Maes P.: Hive: Distributed Agents for Networking Things, 1st International Symposium on Agent Systems and Applications / 3rd International Symposium on Mobile Agents (ASA/MA '99), IEEE Computer Society, Palm Springs, CA, USA, 3-6 October 1999, str. 118-129
5. Subramanian L., Katz R. H.: An Architecture for Building Self-Configurable Systems, International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, Proc. of the 1st ACM International symposium on Mobile ad hoc net-working & computing, Boston, Massachusetts, 2000, str. 63-73
6. Tlaga J., Tlaga W.: Self-Organizing Electronic Swarm System For Security Applications, IV Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, UWM, Olsztyn, 2008, zgłoszenie
7. Tlaga J., Tlaga W.: Agentowy system roju – nowa architektura systemów alarmowych, Systemy Alarmowe, nr 2/2008, str. 36-38
8. Tlaga J., Tlaga W.: Samoorganizujący się system roju – nowe podejście w projektowaniu systemów zabezpieczeń (cz. 2), Ochrona Mienia i Informacji, nr 6/2007, str. 38-42
9. Prostański D., Jonak J.: Sieci neuronowe w badaniach procesu urabiania skał stożkowymi nożami obrotowymi. Monografie KOMAG. Gliwice 2003.
10. Jasiulek D.: Adaptacyjny układ sterowania kombajnu chodnikowego. Rozprawa doktorska, Gliwice 2010.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Mgr inż. Dariusz JENCZMYK
Mgr inż. Joanna ROGALA-ROJEK
Mgr inż. Aleksander PIECHA
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Komputerowe wspomaganie oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej w aspekcie obowiązujących przepisów

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono analizę porównawczą zmian przepisów dotyczących stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Wskazano na zwiększony zakres obowiązkowo gromadzonych danych dokumentujących czasokres i warunki użytkowania podstawowych elementów sekcji oraz celowość zastosowania programów komputerowych i systemów elektronicznych wspomagających w tej dziedzinie pracę użytkownika obudowy zmechanizowanej.

S u m m a r y

Comparative analysis of changes in regulations as regards technical condition of powered roof support is presented in the paper. Necessity of increased amount of data as regards time and conditions of use of main support components as well as purposefulness of use of computer software with electronic systems which aid the work of powered roof support user.

1. Wstęp

W polskim górnictwie dominującym systemem podziemnej eksploatacji pokładów węgla kamiennego jest system ścianowy wyposażony w zmechanizowany komplet ścianowy. Podstawową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa załóg górniczych odgrywają w nim sekcje obudowy zmechanizowanej. W 2008 r. w 31 polskich kopalniach pracowało łącznie ponad 19000 sekcji. Prawidłowa gospodarka i ewidencjonowanie sekcji, zwłaszcza w aspekcie oceny ich stanu technicznego, jest skomplikowanym przedsięwzięciem logistycznym. Konieczność okresowego prowadzenia oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, wynika z Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 25 czerwca 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.

Obowiązujące uprzednio przepisy, dotyczące podziemnych zakładów górniczych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 9 czerwca 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych) zobowiązywały użytkowników sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej do dokumentowania przebiegu eksploatacji każdej sekcji obudowy ścianowej poprzez rejestrację co najmniej [4]:

- roku produkcji,
- roku przeprowadzonej naprawy (remontu lub modernizacji i jej zakresu),
- łącznej wartości wybiegu ścian oraz warunków środowiskowych, w których obudowa była eksploatowana.

Wprowadzone w 2010 r. nowe rozporządzenie przewiduje trwałe i jednoznaczne oznakowywanie każdego elementu podstawowego sekcji obudowy zmechanizowanej (stropnicy, spągnicy, osłony odzawałowej, łączników układu lemniskatowego, stojaków i podpory stropnicy, sworzni łączących elementy podstawowe). Obecnie użytkownik jest zobowiązany do prowadzenia ewidencji elementów podstawowych zawierającej, co najmniej, następujące informacje [5]:

- nazwa producenta,
- rok produkcji,
- rok, w którym wykonano remont,
- podmiot, który wykonał remont,
- rok, w którym wykonano modernizację,
- podmiot, który wykonał modernizację,
- długość wybiegu ścian oraz warunki eksploatacji, w których był stosowany element podstawowy sekcji obudowy zmechanizowanej.

Ponadto, jak wynika z analizy porównawczej przedstawionej w tabelach 1 i 2, w istotny sposób zmieniono przepisy dotyczące oceny stanu technicznego sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej [4, 5].

Analiza porównawcza Rozporządzeń [4, 5] w odniesieniu do procedur oceny stanu technicznego sekcji

Tabela 1

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia **9 czerwca 2006 r.**	Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia **25 czerwca 2010 r.**
Pierwszym etapem rozpoczęcia procesu oceny stopnia zużycia obudowy zmechanizowanej (pkt 4.3.1) było obliczenie wskaźnika Aw (pkt 4.3.4.2). Wartość wskaźnika Aw w sposób automatyczny decydowała (pkt 4.3.7.1 i 4.3.7.2) o wyborze procedury oceny stopnia zużycia.	Podstawą rozpoczęcia procesu oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej (pkt 4.2.1.1) jest raport z analizy dotychczasowego przebiegu użytkowania sekcji obudowy zmechanizowanej (pkt 4.1.17 i 4.1.18). Zakres analizy oraz wzór raportu (pkt 4.1.19) ustala kierownik działu energomechanicznego. Na podstawie danych zawartych w raporcie określa się zakres procedur niezbędnych dla oceny stanu technicznego obudowy zmechanizowanej (pkt 4.1.18).
Brak analogicznych zapisów	Użytkowane sekcje obudowy zmechanizowanej, dla których od roku produkcji upłynęło do 10 lat podlegają kontroli (pkt 4.1.13): – codziennej, przeprowadzanej przez osoby obsługujące, – miesięcznej, przeprowadzanej przez wyznaczoną osobę dozoru ruchu specjalności mechanicznej.
Brak analogicznych zapisów	Użytkowane sekcje obudowy zmechanizowanej, dla których od roku produkcji upłynęło powyżej 10 lat podlegają kontroli (pkt 4.1.14): – codziennej, przeprowadzanej przez osoby obsługujące, – miesięcznej, przeprowadzanej przez wyznaczoną osobę dozoru ruchu o specjalności mechanicznej oraz specjalności górniczej.
Brak analogicznych zapisów	Kierownik działu energomechanicznego ustala zakres kontroli użytkowanych sekcji obudowy zmechanizowanej; zakres ten obejmuje sprawdzenie co najmniej (pkt 4.1.15): – odkształceń, – występowania pęknięć, – szczelności układu hydraulicznego, – występowania innych uszkodzeń.
Brak analogicznych zapisów	Wyniki kontroli użytkowanych sekcji obudowy zmechanizowanej zapisuje się (pkt 4.1.16): – w przypadku kontroli codziennej w książce raportowej, – w przypadku kontroli miesięcznej w książce kontroli obudowy zmechanizowanej, której wzór określa kierownik działu energomechanicznego.
Brak analogicznych zapisów	Osoby wyznaczone przez kierownika ruchu zakładu górniczego przeprowadzają po zakończeniu eksploatacji ściany analizę (pkt 4.1.17): – dotychczasowego przebiegu użytkowania sekcji obudowy zmechanizowanej, z uwzględnieniem wykonanych remontów i modernizacji sekcji, – wyników kontroli codziennych i miesięcznych. Wyniki analizy (pkt 4.1.17) zamieszcza się w raporcie (pkt 4.1.18). Zakres analizy (pkt 4.1.17) oraz wzór raportu (pkt 4.1.18) ustala kierownik działu energomechanicznego (pkt 4.1.19).

Z przedstawionego zestawienia wynika, że w świetle obowiązujących przepisów zakres procedury oceny stanu technicznego sekcji został rozszerzony i ściślej związany z okresem, jaki upłynął od wyprodukowania sekcji. Ponadto, użytkownicy zobowiązani są do szerokiego dokumentowania historii użytkowania elementów sekcji. Zwiększony został zasób obowiązkowo gromadzonych i archiwizowanych informacji dotyczących każdego z posiadanych na stanie kopalni elementów sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej.

Analiza porównawcza zapisów dotyczących wybranych aspektów oceny technicznej sekcji obudowy zmechanizowanej, zawartych w Rozporządzeniach [4, 5]

Tabela 2

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia **9 czerwca 2006 r.**	Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia **25 czerwca 2010 r.**
Elementy nośne sekcji (pkt 4.1.11): 1 Stropnica 2 Spągnica (spągnice) 3 Osłona odzawałowa 4 Łączniki układu lemniskatowego 5 Sworznie przegubów centralnych, układu lemniskatowego, stropnicy oraz spągnicy	Elementy podstawowe sekcji (pkt 4.1.9): 1 Stropnica 2 Spągnica 3 Osłona odzawałowa 4 Łączniki układu lemniskatowego 5 Stojaki i podpory stropnic 6 Sworznie łączące elementy podstawowe, z wyjątkiem sworzni łączących stojaki z konstrukcją obudowy
Brak zapisów dotyczących identyfikacji elementów nośnych sekcji (w praktyce producent lub zakład remontowy trwale oznaczał tylko zespoły konstrukcji, tj. stropnice, osłony odzawałowe, łączniki lemniskatowe i spągnice). Sworznie nie były trwale znakowane. Użytkownik zobowiązany był do dokumentowania przebiegu eksploatacji każdej sekcji obudowy (pkt 4.1.8).	Wymagane jest trwałe i jednoznaczne znakowanie każdego elementu podstawowego sekcji obudowy zmechanizowanej (pkt 4.1.10). Wprowadza się wymóg prowadzenia przez użytkownika ewidencji elementów podstawowych sekcji obudowy zmechanizowanej (pkt 4.1.11). Dopuszcza się prowadzenie ewidencji elementów podstawowych sekcji obudowy zmechanizowanej w systemie teleinformatycznym (pkt 4.1.12).
Sprecyzowano metodykę oceny obudowy zmodernizowanej (pkt 4.1.12)	W nowym rozporządzeniu nie ma zapisów dotyczących postępowania z obudową zmodernizowaną.
W pkt. 4.1.13 zawarto wymóg obligatoryjnego badania technicznego (według pkt. 4.3.6), 10% elementów nośnych sekcji obudowy zmechanizowanej poddanych remontowi.	W nowym rozporządzeniu nie ma żadnych zapisów dotyczących postępowania z obudową remontowaną.
Pkt 4.3.2. Skład Komisji ds. oceny stopnia zużycia sekcji obudowy zmechanizowane: – przedstawiciele zakładu górniczego, – przedstawiciele producenta, – przedstawiciele jednostki upoważnionej do przeprowadzania badań i oceny wyrobów.	Pkt 4.2.1.2. Skład Komisji ds. oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej: – przedstawiciele zakładu górniczego, – przedstawiciele jednostki, notyfikowanej w zakresie obudów zmechanizowanych, – przedstawiciele producenta lub podmiotu wykonującego remont.
Konieczność przeprowadzenia w akredytowanym laboratorium sprawdzenia ciśnienia otwarcia i zamknięcia bloków zaworowych i zaworów upustowych na próbce wynoszącej 3% bloków zaworowych i 1% zaworów upustowych zamontowanych w ścianie (pkt 4.3.5.4).	Konieczność sprawdzenia ciśnienia otwarcia i zamknięcia zaworów ograniczających ciśnienie w stojakach i podporach stropnic w akredytowanym laboratorium na próbce wynoszącej co najmniej 10 zaworów (pkt 4.2.2.2).
W pkt 4.3.3 określono metody oceny stopnia zużycia obudowy zmechanizowanej, w szczególności konieczność badania technicznego (według pkt 4.3.6) wszystkich sekcji gdy: – od roku produkcji minęło 10 lat, – Aw ≥ 4000, – wystąpiły rozbieżności wyników pomiędzy obliczonym Aw a przeglądem technicznym, – ustalenie roku produkcji sekcji lub elementu nośnego nie jest możliwe. Jeżeli Aw ≥ 4000, wówczas jedna sekcja obudowy zmechanizowanej obligatoryjnie była przekazywana do badań w akredytowanym laboratorium (pkt 4.3.7.2).	W pkt 4.2.3.1 określono w tabeli liczbę sekcji obudowy zmechanizowanej poddanych badaniu technicznemu w zależności od liczby lat od roku ich produkcji. Tabela do pkt 4.2.3.1 wskazuje do badania w akredytowany laboratorium tylko jedną, wytypowaną przez Komisję z sekcji obudowy, których wiek przekroczył 20 lat od daty produkcji.
W pkt 4.3.6.3 określono szczegółowy zakres i kryteria badania technicznego obudowy zmechanizowanej.	W pkt 4.2.3.3 określono ogólny zakres badania technicznego. Kryteria szczegółowe powinny być określone w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej producenta lub w dokumentacji remontowej zakładu wykonującego remont.
Protokoły z obliczonego Aw, przeglądu technicznego i badań technicznych zatwierdzone przez KRZG należało przechowywać wraz z książką kontroli obudowy zmechanizowanej (pkt 4.3.4.12, pkt 4.3.5.5, pkt 4.3.6.5).	KRZG potwierdza spełnienie warunków zawartych w protokole z oceny stanu technicznego obudowy zmechanizowanej. Dokument zawierający potwierdzenie przechowuje się wraz z książką kontroli obudowy zmechanizowanej (pkt 4.2.5 i pkt 4.2.5.1).
W przypadku negatywnych wyników badania technicznego (pkt 4.3.7.1), protokół zawierający zakres remontu zatwierdzony przez KRZG przechowuje się wraz z książką kontroli obudowy zmechanizowanej, a jego kopię przekazuje do OUG (pkt 4.3.7.2).	W nowym rozporządzeniu nie ma takiego zapisu.
Zakres badań nieniszczących dla przeglądu technicznego określała komisja (pkt 4.3.5.1).	Badaniom nieniszczącym poddaje się spoiny elementów podstawowych tylko dla sekcji wytypowanych do badania technicznego (pkt 4.2.3.3).

W ostatnich latach w systemach ewidencji coraz większą popularność zdobywa technologia RFID (Radio Frequency Identification) polegająca na kontroli przepływu towarów w oparciu o zdalny, poprzez fale radiowe, odczyt i zapis danych z wykorzystaniem specjalnych układów elektronicznych przytwierdzonych do nadzorowanych przedmiotów. Mając na uwadze pojawienie się nowoczesnego sposobu znakowania elementów za pomocą technologii RFID oraz wychodząc naprzeciw oczekiwaniom użytkowników zespół specjalistów ITG KOMAG, Politechniki Śląskiej oraz firmy ELSTA Sp. z o.o. opracował „Elektroniczny system identyfikacji elementów sekcji obudowy zmechanizowanej" [1, 2], umożliwiający komputerowe prowadzeniem gospodarki materiałowej w kopalniach węgla kamiennego. Idea zdalnego odczytu oraz przyjęte rozwiązania konstrukcyjne wraz z oprogramowaniem zapewniają automatyzację procesu pozyskiwania, opracowywania i archiwizacji danych, stanowiących źródło wiarygodnej informacji o faktycznym stanie eksploatowanych elementów [3].

2. Procedury i zakres oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Poniżej przedstawiono przykładowe zestawienie zakresu i zastosowanych, zgodnie z Rozporządzeniem [5], procedur oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej w przypadku wybranych czterech wyrobisk ścianowych.

Procedury i zakres oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej dla ściany 1 [5]

Tabela 3

Planowane wyposażenie ściany	Zakres badań technicznych
60 sekcji obudowy typu A z datą produkcji wersji pierwotnej 1983 r., a zmodernizowanych w 2006 r.	Przegląd techniczny 60 sekcji obudowy typu A. Badanie techniczne 4 sekcji obudowy typu A. Badanie stanowiskowe 1 sekcji obudowy typu A w akredytowanym laboratorium.
50 sekcji obudowy typu B z datą produkcji wersji pierwotnej 1985 r., a zmodernizowanych w 2004 r.	Przegląd techniczny 50 sekcji obudowy typu B. Badanie techniczne 4 sekcji obudowy typu B. Badanie stanowiskowe 1 sekcji obudowy typu B w akredytowanym laboratorium.
50 sekcji obudowy typu C z datą produkcji wersji pierwotnej 1990 r., a zmodernizowanych w 2006 r.	Przegląd techniczny 50 sekcji obudowy typu C. Badanie techniczne 4 sekcji obudowy typu C. Badanie stanowiskowe 1 sekcji obudowy typu C w akredytowanym laboratorium.
5 sekcji skrajnych obudowy typu D z nieokreśloną datą produkcji, a zmodernizowanych w 2002 r.	Przegląd techniczny 5 sekcji obudowy typu D. Badanie techniczne 4 sekcji obudowy typu D. Badanie stanowiskowe 1 sekcji obudowy typu D w akredytowanym laboratorium. Sprawdzenie w akredytowanym laboratorium ciśnienia otwarcia i zamknięcia co najmniej 10 zaworów ograniczających ciśnienie w stojakach i podporach stropnicy.

Procedury i zakres oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej dla ściany 2 [5]

Tabela 4

Planowane wyposażenie ściany	Zakres badań technicznych
150 sekcji liniowych i 5 sekcji skrajnych obudowy typu E wyprodukowanych w 2007 r.	Przegląd techniczny 150 sekcji liniowych i 5 sekcji skrajnych obudowy typu E. Sprawdzenie w akredytowanym laboratorium ciśnienia otwarcia i zamknięcia co najmniej 10 zaworów ograniczających ciśnienie w stojakach i podporach stropnicy.

Procedury i zakres oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej dla ściany 3 [5]

Tabela 5

Planowane wyposażenie ściany	Zakres badań technicznych
150 sekcji liniowych i 5 sekcji skrajnych obudowy typu A wyprodukowanych w 1989 r., a zmodernizowanych w 2008 r. Obudowa posiada certyfikat CE i zakończyła eksploatację pierwszej ściany.	Przegląd techniczny 150 sekcji liniowych i 5 sekcji skrajnych obudowy typu A. Badanie techniczne 4 sekcji obudowy typu A. Badanie stanowiskowe 1 sekcji LINIOWEJ obudowy typu A w akredytowanym laboratorium. Sprawdzenie w akredytowanym laboratorium ciśnienia otwarcia i zamknięcia co najmniej 10 zaworów ograniczających ciśnienie w stojakach i podporach stropnicy.

Procedury i zakres oceny stanu technicznego sekcji obudowy zmechanizowanej dla ściany 4 [5]

Tabela 6

Planowane wyposażenie ściany	Zakres badań technicznych
Ściana nr 4 będąca w ruchu, do której w związku z wydłużeniem ściany, należy zabudować np. 2 sekcje skrajne obudowy typu D wyprodukowane w 1988 r., a zmodernizowane w 2004 r.	Badanie stanowiskowe 1 sekcji skrajnej obudowy typu D w akredytowanym laboratorium. Badanie techniczne 2 sekcji skrajnych obudowy typu D.

Z informacji zestawionych w tabelach wynika, że obecnie znacznie mniej sekcji poddawanych jest badaniom technicznym. Zwiększyła się natomiast liczba sekcji, które muszą być poddane badaniom stanowiskowym w akredytowanym laboratorium.

Wyniki tych badań w połączeniu z „Systemem identyfikacji elementów sekcji obudowy zmechanizowanej" umożliwiają wiarygodniejszą ocenę stanu technicznego sekcji, w porównaniu z procedurą oceny bazującą na wskaźniku Aw, tym samym przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa stanowiskowego w wyrobiskach ścianowych.

3. Podsumowanie

W świetle nowych przepisów (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 czerwca 2010 r.) użytkownicy systemu ścianowego zobowiązani są do szerokiego dokumentowania przebiegu pracy elementów sekcji oraz prowadzenia przeglądów technicznych. Przedstawiona w artykule analiza porównawcza stanu bieżącego z uprzednio obowiązującymi przepisami wykazała, że w istotny sposób zwiększony został zakres niezbędnych informacji jakie należy przechowywać dla każdego z posiadanych na stanie kopalni elementów sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej.

Opracowany przez ITG KOMAG, Politechnikę Śląską i firmę Elsta Sp. z o.o. system identyfikacji elementów sekcji obudowy zmechanizowanej, wykorzystujący technologię RFID, wspomaga prowadzenie gospodarki środkami trwałymi w kopalniach węgla kamiennego. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne wraz z oprogramowaniem zapewniają automatyzację pracy i umożliwiają pozyskanie źródła wiarygodnej informacji o stanie technicznym poszczególnych elementów.

Literatura

1. Fitowski K., Jankowski H., Jaszczuk M., Jenczmyk D., Krzak Ł., Pieczora E., Stankiewicz J., Szczurowski M., Rogala J., Warzecha M., Worek C.: Nowoczesny sposób identyfikacji elementów sekcji obudowy ścianowej za pomocą technologii RFID. Materiały na konferencję: „Nowe trendy w budowie maszyn górniczych" Konferencja Naukowo-Techniczna, Wysowa-Zdrój, luty 2006, 37-39.
2. Jaszczuk M**.**, Piecha A., Pieczora E., Rogala-Rojek J., Fitowski K., Szczurkowski M.: Wykorzystanie technologii RFID oraz nowoczesnych systemów bazodanowych do zarządzania bezpieczeństwem użytkowania sekcji ścianowej obudowy zmechanizowanej. Materiały na konferencję: EMTECH 2009 "Zasilanie, informatyka techniczna i automatyka w przemyśle wydobywczym. Innowacyjność i bezpieczeństwo", Ossa k. Rawy Mazowieckiej, 10-13 maja 2009 s. 157-164.
3. Jaszczuk M., Jenczmyk D., Pieczora E., Rogala J.: Use of RFID technology to increase operational safety of powered roof supports. Materiały na konferencję: "High Performance Mining", RWTH Aachen, June 3rd and 4th, 2009 s. 91-102.
4. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 9 czerwca 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.
5. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 czerwca 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Dr inż. Krzysztof STANKIEWICZ
Mgr inż. Jerzy JURA
Mgr inż. Sławomir BARTOSZEK
Mgr inż. Jerzy JAGODA
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

System diagnostyczny ładowarki bocznie wysypującej bazujący na iskrobezpiecznej magistrali CAN

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono koncepcję systemu diagnostycznego dedykowanego ładowarce bocznie wysypującej, z wykorzystaniem rozproszonego systemu sterowania, bazującego na magistrali CAN. Zaprezentowano założenia w odniesieniu do oprogramowania wizualizacyjnego i analizującego zarejestrowane dane pomiarowe.

S u m m a r y

A concept of diagnostic system dedicated to side discharge loader with the use of fuzzy logic control system based on CAN bus is presented in the paper. Assumptions as regards visualization software, which analyses recorded measuring data, are presented.

1. Wprowadzenie

Ładowarka bocznie wysypująca eksploatowana w korytarzowych wyrobiskach górniczych pracuje w trudnych warunkach. Jej eksploatacja realizowana jest na granicy maksymalnych parametrów wytrzymałościowych konstrukcji mechanicznej i układu hydraulicznego. W przypadku zaistniałej awarii niejednokrotnie trudno jest określić w jakich warunkach ładowarka była eksploatowana przed jej powstaniem.

W tym celu, do określenia warunków eksploatacji ładowarki może zostać zastosowany system monitoringu i diagnostyki. Pierwszym krokiem w celu przygotowania takiego systemu jest utworzenie układu sprzętowej rejestracji parametrów podlegających diagnostyce. Z analizy danych zarejestrowanych można określić przyczyny awarii i stwierdzić, czy ładowarka była eksploatowana zgodnie z jej przeznaczeniem. Brak wiarygodnych informacji o sposobie i warunkach eksploatacji uniemożliwia właściwy nadzór nad ładowarką. System rejestracji parametrów pracy pozwoli na określenie kto i w jaki sposób eksploatował ładowarkę. Implementację systemu przewidziano w ładowarce ŁBT -1200M (rys. 1) oraz ŁJK-1200 (rys. 2).

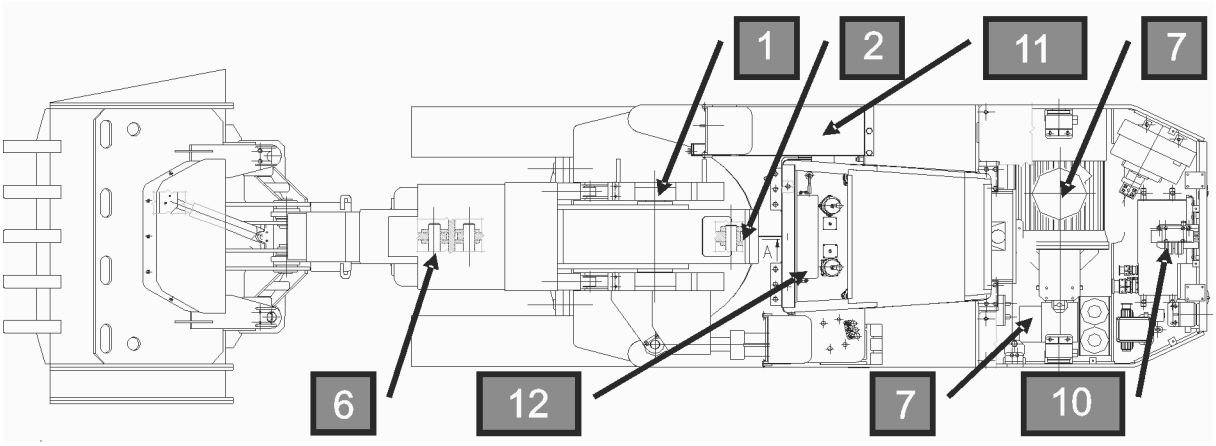
Rys.1. Ładowarka bocznie wysypująca ŁBT 1200M prod. ZM Bumar Łabędy [5]

Rys.2. Ładowarka bocznie wysypująca ŁJK 1200 prod. Jukator [materiał własny ITG KOMAG]

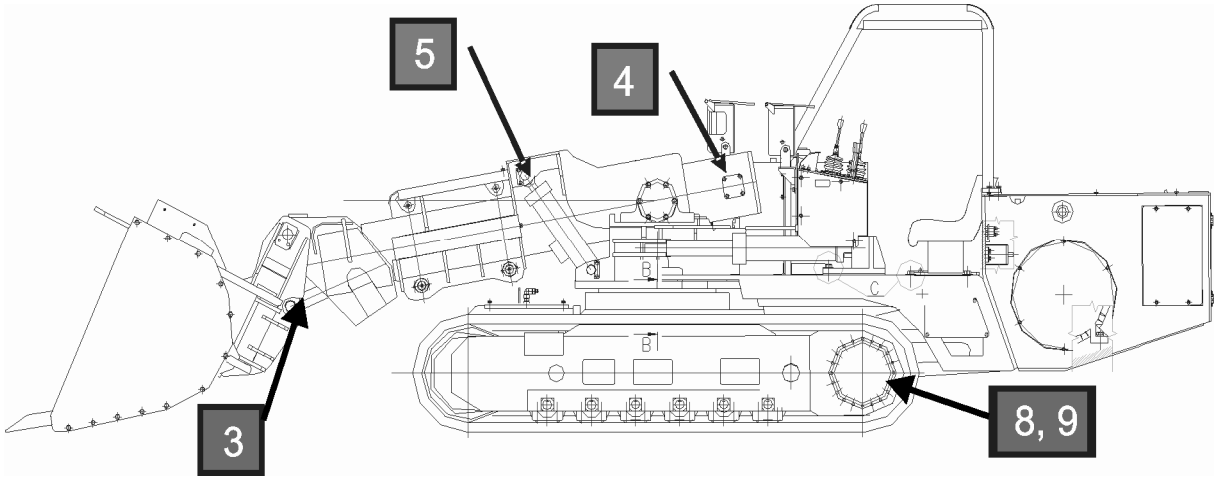
2. Dobór punktów pomiarowych

Najważniejszym elementem systemu monitorowania pracy ładowarki jest dobór właściwych punktów pomiarowych. Dokonano wyboru punktów pomiarowych uwzględniających wszystkie możliwe parametry. W wyniku przeprowadzonych analiz opracowano system rejestracji następujących parametrów pracy ładowarki (rys. 3a, 3b):

1. Kąt podniesienia wysięgnika.
2. Kąt obrotu wysięgnika.
3. Długość wysuwu siłownika podnoszenia czerpaka.
4. Siła w siłowniku wysuwu ramienia.
5. Siła w lewym i prawym siłowniku podnoszenia wysięgnika.
6. Siła w siłowniku podnoszenia łyżki.
7. Ciśnienie główne układu hydraulicznego.
8. Droga prawej gąsienicy.
9. Droga lewej gąsienicy.
10. Natężenie prądu silnika elektrycznego.
11. Temperatura i poziom oleju hydraulicznego.
12. Kąty pochylenia ładowarki względem poziomu.



Rys.3a. Rozmieszczenie przetworników pomiarowych [opracowanie własne ITG KOMAG]



Rys.3b. Rozmieszczenie przetworników pomiarowych [opracowanie własne ITG KOMAG]

3. Budowa systemu rejestracji parametrów pracy

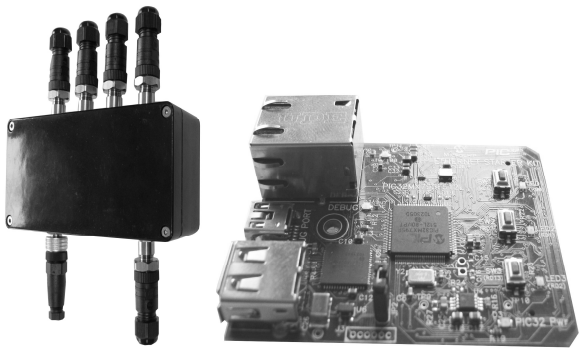
System rejestracji parametrów pracy ładowarki oparto o moduły projektowane w ITG KOMAG oraz przetworniki analogowe wielkości nieelektrycznych w wykonaniu iskrobezpiecznym. System bazuje na architekturze systemów rozproszonych [8]. Łącznikiem spajającym poszczególne elementy układu sterowania jest cyfrowa magistrala danych CAN [7]. Moduły przetworników z magistralą CAN będą zabudowane możliwie najbliżej przetwornika lub czujnika. Połączenia między modułami zwierają dwa przewody sygnałowe, dwa przewody zasilające napięciem 12 VDC z zasilacza iskrobezpiecznego oraz ekranu.

W celu zapewnienia wymagań urządzeń zabudowanych w strefie zagrożonej wybuchem poszczególne moduły będą połączone z korpusem ładowarki.

Rozmieszczenie modułów zoptymalizowano w aspekcie przebiegu kabli osłoniętych przed narażeniami mechanicznymi. Schemat blokowy systemu rejestracji parametrów pracy ładowarki przedstawiony jest na rysunku. 5.

4. Rejestrator z magistralą CAN

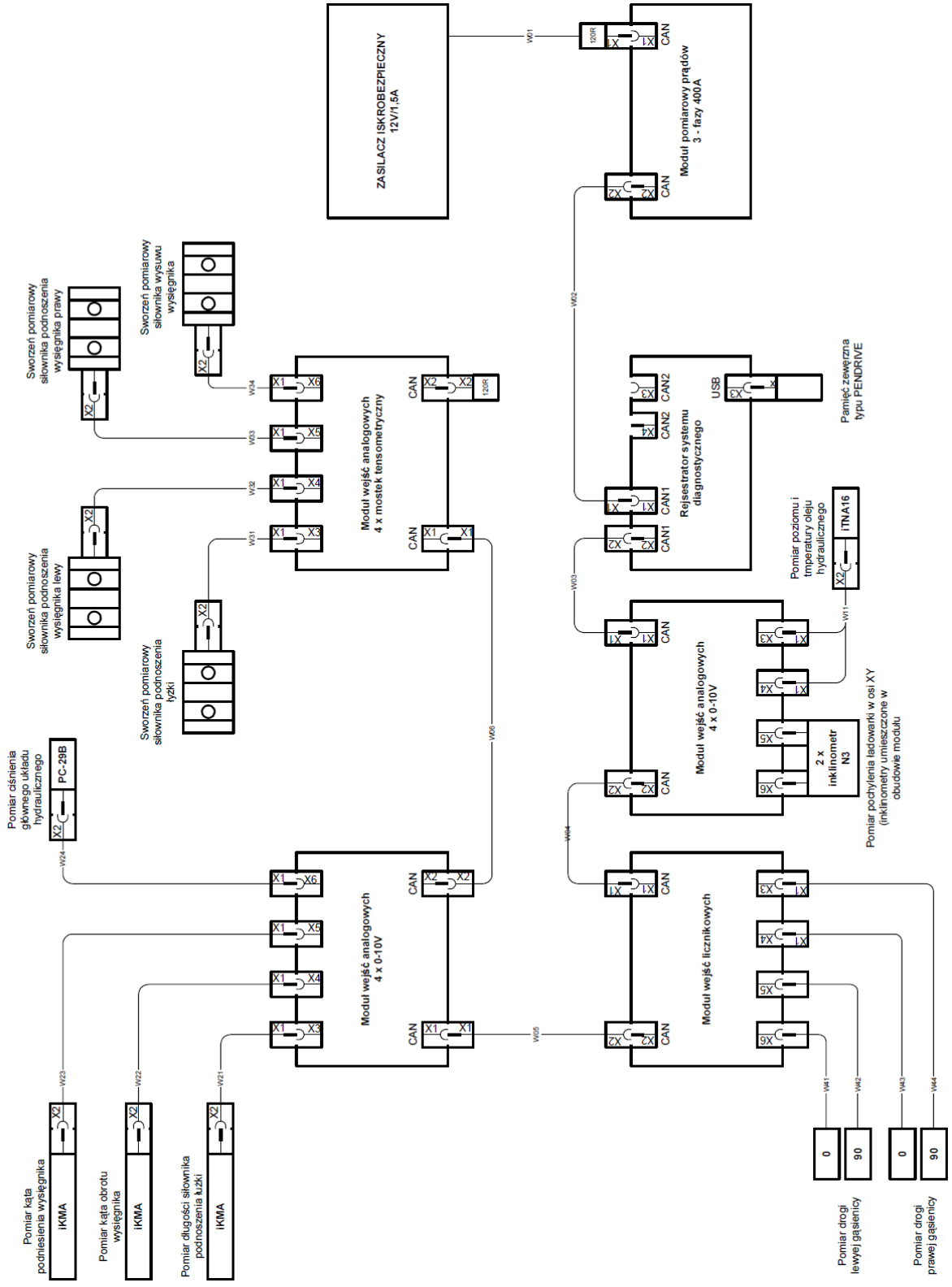
Jako rejestrator parametrów pracy ładowarki wykorzystano sterownik CAN (rys. 4) opracowany w ITG KOMAG. Rejestrator wyposażono w dwa niezależne interfejsy CAN w wykonaniu iskrobezpiecznym, interfejs ETHERNET oraz złącze USB umożliwiające podłączenie pamięci typu PENDRIVE FLASH. W zewnętrznej pamięci FLASH zapisywane będą dane pomiarowe. Rejestrator wyposażono w zegar czasu rzeczywistego.



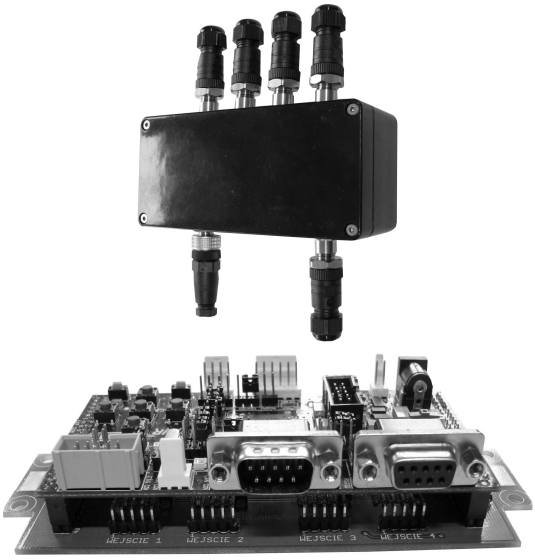
Rys.4. Rejestrator z magistralą CAN [opracowanie własne ITG KOMAG]

5. Moduł wejść analogowych

W systemie rejestracji parametrów pracy ładowarki zostaną wykorzystane cztery moduły, wykonane w trzech wariantach (dwa moduły zostaną wyposażone w interfejs analogowy umożliwiający podłączenie sygnałów napięciowych 0-10 V, jeden moduł wyposażony w interfejs wejść pomiarowych dostosowanych do pomiaru napięć z mostków tensometrycznych oraz jeden moduł wejść licznikowych). Na rysunku 6 przedstawiono moduł wejść analogowych.



Rys.5. Schemat blokowy systemu rejestracji parametrów pracy ładowarki [opracowanie własne ITG KOMAG]



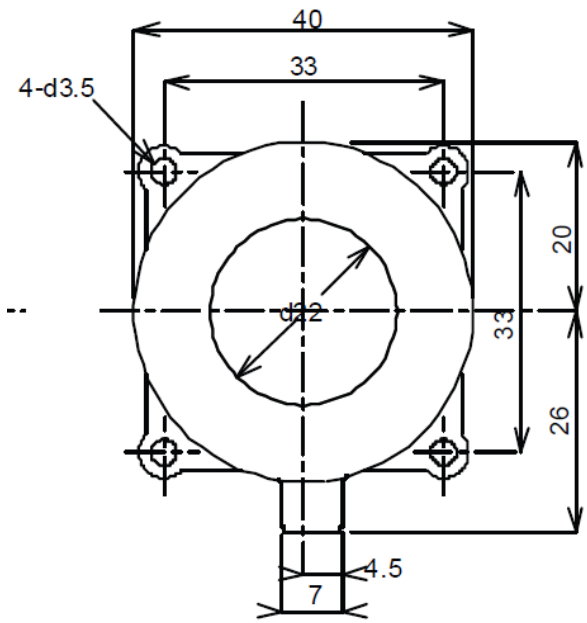
Rys.6. Moduł wejść analogowych
[opracowanie własne ITG KOMAG]

6. Moduł pomiaru natężenia prądu

Do monitorowania wartości prądu zasilającego silnik ładowarki niezbędne było opracowanie modułu pomiarowego prądów z magistralą CAN. Na rysunku 7 przedstawiono model przestrzenny takiego modułu.

Rys.7. Model przestrzenny modułu pomiarowego prądu 3x400 A [opracowanie własne ITG KOMAG]

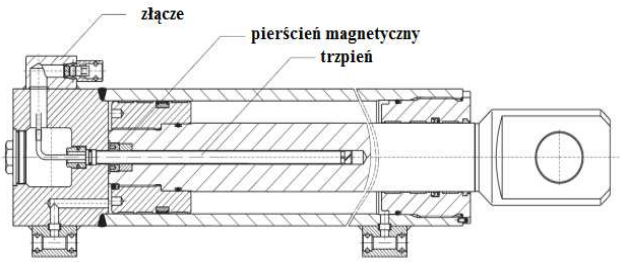
Konstrukcja modułu pomiarowego oparta będzie o przekładniki prądowe bezkontaktowe prądu stałego i zmiennego. Do tego celu wybrano przekładniki typu HTFS 400-P [1] (rys. 8). Umożliwią one pomiary prądów rozruchowych do 600 A. Zastosowanie przekładnika z pomiarem składowej stałej prądu i przetworników analogowo-cyfrowych pozwoli na pomiar prądów zniekształconych przez falowniki w zakresie częstotliwości, jak i kształtu przebiegu prądowego.



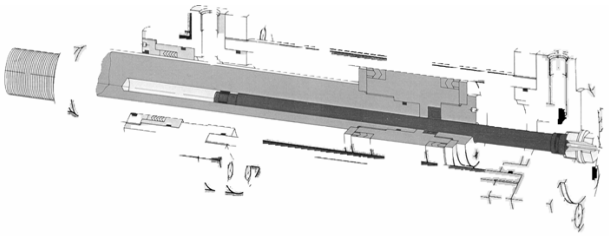
Rys.8. Przekładnik prądowy HTFS [1]

7. Przetworniki pomiaru długości wysuwu siłownika i kąta wychylenia wysięgnika zespołu roboczego IKMA firmy TIEFENBACH

Do pomiaru długości wysuwu siłownika oraz pochylenia i kąta obrotu wysięgnika zaproponowano przetworniki iskrobezpieczne serii iKMA firmy TIEFENBACH [2]. Przetworniki posiadają wyjścia napięciowe 0,5-4,5 V. Sygnały przetwarzane są przez moduły wejść analogowych. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przetworniki mierzące długość wysuwu siłownika serii iKMA.

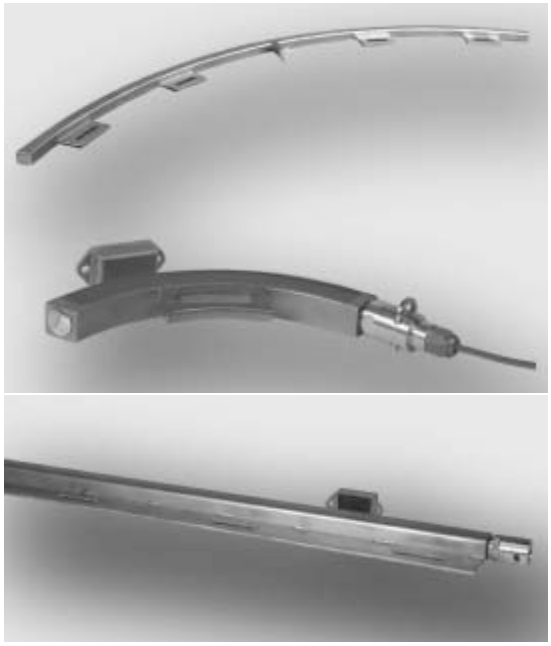


Rys.9. Przetwornik pomiaru długości wysuwu siłownika serii iKMA [2]



Rys.10. Przetwornik pomiaru długości wysuwu siłownika serii iKMA [2]

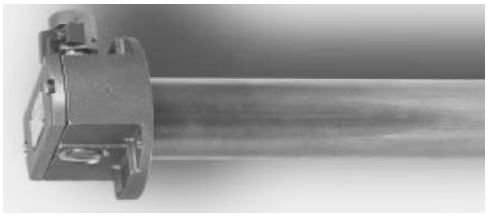
Na rysunku 11 przedstawiono wybrane przetworniki serii iKMA mierzące kąt obrotu wysięgnika.



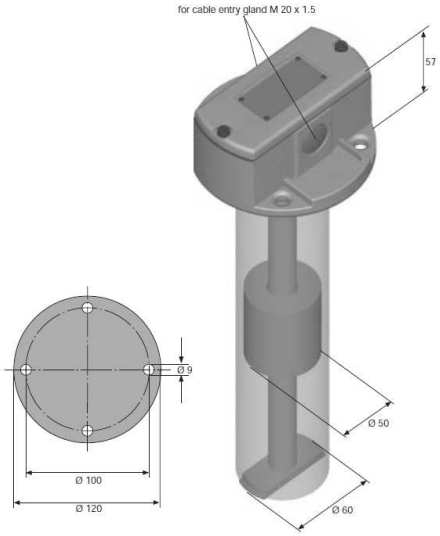
Rys.11. Przetworniki pomiarowe kąta serii iKMA [2]

8. Przetwornik poziomu i temperatury oleju hydraulicznego

Do pomiaru poziomu i temperatury oleju hydraulicznego zaproponowano przetwornik iskrobezpieczny serii iTNA16 firmy TIEFENBACH (rys. 12 i 13) [2]. Przetwornik posiada wyjście napięciowe 0,5÷4,5 V. Sygnał ten przetwarzany jest przez moduł wejść analogowych.



Rys.12. Przetwornik poziomu i temperatury oleju hydraulicznego iTNA16 [2]



Rys.13. Wymiary przetwornika iTNA16 [2]

9. Przetworniki pomiarowe siły – sworznie z mostkiem tensometrycznym

Do pomiaru obciążenia konstrukcji ładowarki i siłowników zostaną wykorzystane sworznie pomiarowe z wbudowanym mostkiem tensometrycznym. Takie rozwiązanie nie spowoduje dużych zmian w konstrukcji ładowarki. Na rysunku 14 przedstawiono przykładowe konstrukcje sworzni pomiarowych.

Rys.14. Sworzeń pomiarowy z zabudowanym mostkiem tensometrycznym [3]

10. Pomiar kąta pochylenia ładowarki – inklinometr

Do pomiaru kąta pochylenia ładowarki w dwóch osiach zostaną wykorzystane inklinometry z wyjściem napięciowym 0,5-4,5 V, podłączone do modułu wejść analogowych. Inklinometry zostaną zabudowane wewnątrz obudowy modułu wejść analogowych.

Rys.15. Inklinometr serii NA [5]

11. Podsumowanie

Proponowany system rejestracji parametrów pracy ładowarki posiada następujące zalety:

- jest uniwersalny i może być stosowany do innych maszyn górniczych w obwodach iskrobezpiecznych i nieiskrobezpiecznych;
- moduły wejść/wyjść mogą być dostosowane do różnych przetworników wielkości nieelektrycznych;
- rejestrowane parametry mogą zostać poddane analizie z wykorzystaniem zaawansowanych, zewnętrznych aplikacji komputerowych, np. z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania;

– system jest otwarty i pozwala w łatwy sposób na modyfikacje liczby i typów podłączanych czujników oraz przetworników.

Literatura

1. Strona internetowa firmy LEM, www.lem.com
2. Strona internetowa firmy Tiefenbach, www.tifenbach.com
3. Strona internetowa firmy BROSA, www.brosa.net
4. Strona internetowa firmy SEIKA, www.seika.de
5. Strona internetowa firmy Bumar Łabędy SA www.bumar.gliwice.pl
6. BOSCH GmbH: CAN Specyfication ver 2.0, 1991
7. Jura J., Hałek R.: Konstrukcja układów sterowania pojazdów inżynieryjnych opartych o integralne zespoły połączone cyfrową magistralą danych, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe Biuletyn nr 15, strona 113, Gliwice 2002
8. Tanenbaum A.S., Stehen M.V.: Systemy rozproszone. Zasady i paradygmaty. Klasyka informatyki. WN-T, Warszawa 2006.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Mgr inż. Piotr DOBRZANIECKI
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Badania stanowiskowe górniczego napędu spalinowego

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z przeprowadzonymi w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG badaniami silnika spalinowego. Przedstawiono problem badawczy, zaprezentowano środki techniczne, które zostały zastosowane podczas realizacji prac, oraz przedstawiono otrzymane wyniki.

S u m m a r y

Problems associated with tests of diesel engine, which were carried out at the KOMAG Institute of Mining Technology, are presented in the paper. Research problem has been formulated and technical means, which were used during project realization, as well as obtained results are given.

1. Wstęp

Ze względu na powszechne wykorzystanie silnika spalinowego jako źródła mocy w układach napędowych, badaniu silników poświęcono wiele miejsca w literaturze. Potrzeba poznania parametrów pracy konkretnego silnika (lub typu) w poszczególnych jego aplikacjach wiąże się z rozwojem nowych rozwiązań technicznych. Jako przykład można podać przemysł motoryzacyjny, a także wszelkie gałęzie przemysłu, w których silniki spalinowe wykorzystywane są do napędu maszyn roboczych, pojazdów specjalnego przeznaczenia, układów generatorowych, w marynistyce itd.

Rosnące wymagania użytkowników w aspekcie sprawności, niezawodności oraz wymagań środowiskowych sprawiają, że badania stanowią ważny etap w procesie życia produktu. Również w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG prowadzone są prace nad rozwojem górniczych napędów spalinowych.

Podstawową informacją na temat parametrów osiąganych przez urządzenie techniczne jest jego charakterystyka pracy. W przypadku silnika spalinowego jest to najczęściej charakterystyka zewnętrzna $M_s = f(n_s)$ i/lub $N_e = f(n_s)$. Na jej podstawie określane są parametry pozostałych elementów układu napędowego oraz stanowi punkt wyjścia dla oceny własności trakcyjnych napędu.

Zasadniczym problemem, dotąd nie analizowanym w znanych autorowi publikacjach, było określenie wpływu ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na parametry silnika, z którym układ ten współpracuje oraz utworzenie charakterystyk silnika stanowiącego element górniczego napędu spalinowego.

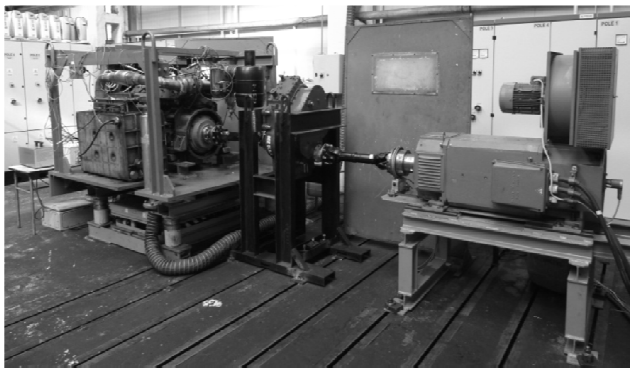
W tym celu podjęto w KOMAG-u prace, których efektem było powstanie stanowiska do badań górniczych napędów spalinowych. Stanowisko umożliwia pomiar i rejestrację parametrów pracy silnika, wyposażonego lub nie w układ dolotowo-wylotowy przeznaczony do pracy w warunkach zagrożenia wybuchem atmosfery potencjalnie niebezpiecznej. Dzięki pracom badawczym określono wpływ ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego według rozwiązania KOMAG-u na parametry pracy silnika.

2. Stanowisko badawcze do badań górniczych napędów spalinowych

Stanowisko do badania wpływu górniczego osprzętu silnika spalinowego na parametry jego pracy składa się z następujących, głównych elementów:

- silnika spalinowego w ramie mocującej,
- przekładni redukcyjnej,
- hamowni elektrycznej.

Widok stanowiska pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Stanowisko do badań górniczych napędów spalinowych zbudowane w KOMAG-u. [1]

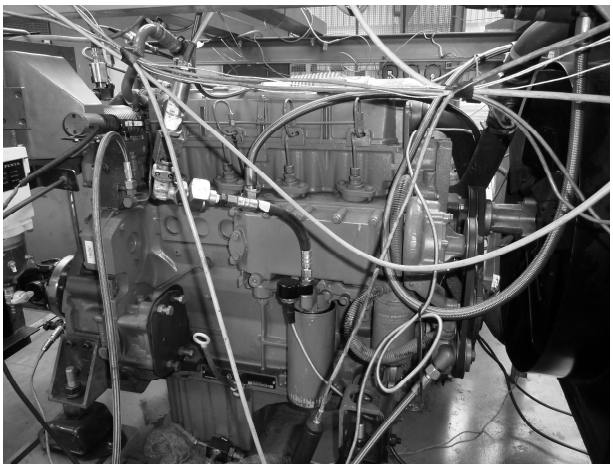
2.1. Silnik spalinowy

Obiektem badawczym był pokazany na rysunku 2 silnik spalinowy Volvo Penta D5A T o zapłonie samoczynnym. Silnik D5A T jest jednostką w wykonaniu morskim co oznacza, że turbosprężarka oraz kolektor wylotowy są chłodzone wodą. Podstawowe parametry silnika pokazano w tabeli 1.

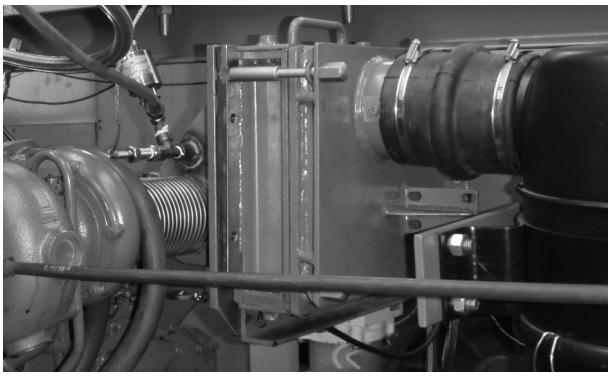
Silnik spalinowy, stanowiący część górniczego napędu spalinowego, wyposażony jest w następujące ele-

menty, umożliwiające jego bezpieczną pracę w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego:

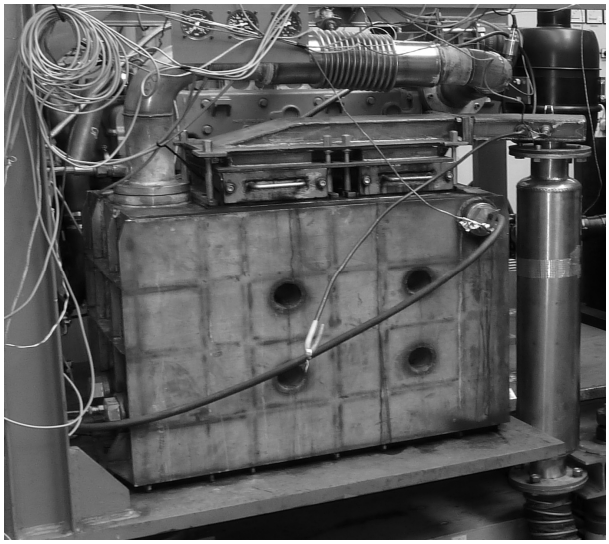
- ognioszczelny układ dolotowy, wyposażony w przerywacz płomieni (rys. 3),
- ognioszczelny układ wylotowy, wyposażony w chłodzony cieczą przewód wylotu spalin, wodną płuczkę spalin, przerywacze płomienia oraz iskrochron (rys. 4).



Rys.2. Silnik spalinowy Volvo Penta D5A T na stanowisku badawczym [1]



Rys.3. Układ dolotowy silnika [1]



Rys.4. Układ wylotowy silnika [1]

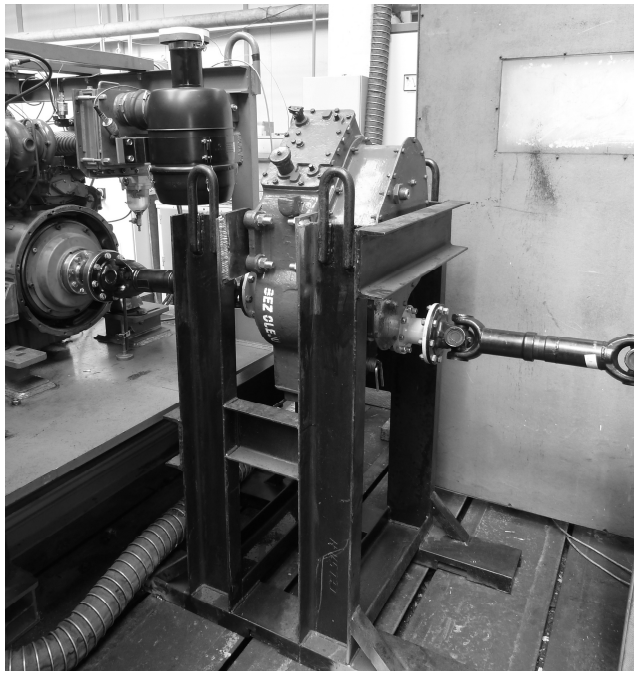
Podstawowe parametry silnika D5A T

Tabela 1

Liczba cylindrów	4
Pojemność skokowa	4760 cm^3
Moc maksymalna	81 kW (n=2300 obr./min.)
Moment maksymalny	382 Nm (n=1500 obr./min.)

2.2. Przekładnia redukcyjna

Konieczność zredukowania obrotów silnika spalinowego, w celu dopasowania do parametrów hamowni elektrycznej spowodowała, że jako przekładnię redukcyjną użyto zmodyfikowaną skrzynię biegów SB-102, pokazaną na rysunku 5. Modyfikacja polegała na wykorzystaniu jednego ze stopni przekładni, usunięciu zbędnych wałków oraz kół i wyeliminowaniu sprzęgieł wielopłytkowych. Wymieniono wszystkie węzły łożyskowe, pozostawiając oryginalne koła zębate oraz wał wyjściowy. Wał wejściowy przekładni zmodyfikowano i dostosowano do nowego miejsca zabudowy. Przełożenie przekładni wynosi *i=1/1,725*.



Rys.5. Przekładnia redukcyjna [1]

2.3. Hamownia elektryczna

Do obciążania silnika spalinowego zastosowano silnik elektryczny Leroy Somer LSK 2254 L11. Jego podstawowe parametry pokazano w tabeli 2. Silnik elektryczny sterowany był za pośrednictwem układu z falownikiem.

Podstawowe parametry silnika elektrycznego Leroy Somer LSK 2254 L11

Tabela 2

Napięcie zasilania	3x380 V
Moc maksymalna	223 kW (n=1520 obr./min.)
Moment nominalny	1400 Nm

3. Badania silnika

3.1. Metodyka badań

W celu określenia wpływu ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na parametry pracy silnika przeprowadzono dwa cykle badań wg poniższej procedury:

- zakres prędkości obrotowej osiąganej przez silnik zmieniano co 200 obr/min, natomiast w obszarze przegięcia charakterystyki co 100 obr/min.
- badania rozpoczęto od prędkości maksymalnej,
- moment obrotowy, którym obciążano silnik spalinowy, zmieniano co 25 Nm, począwszy od biegu luzem, a kończąc na maksymalnej wartości (dla ustalonej prędkości obrotowej) przy której silnik pracował stabilnie.

Podczas badań rejestrowano wartości następujących parametrów:

- prędkość obrotowa,
- moment obrotowy,
- ciśnienie panujące w układzie dolotowo-wylotowym,
- temperatura w wybranych punktach układu dolotowo-wylotowego,
- zużycie paliwa.

Dla każdej prędkości obrotowej, po ustabilizowaniu pracy silnika przy danym obciążeniu i dokonaniu rejestracji parametrów pracy sporządzano wykres zużycia paliwa.

Cykl badawczy składał się z dwóch części:

a) badania silnika bez ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego,

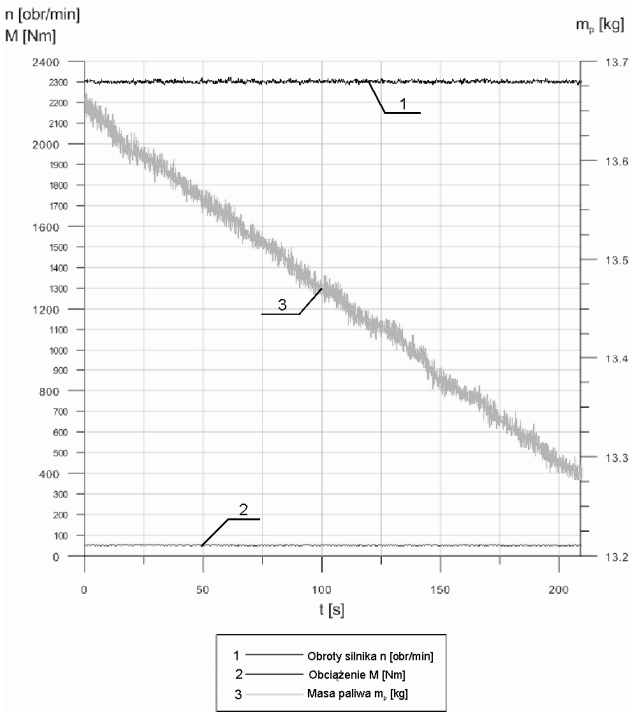
b) badania silnika wyposażonego w ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy.

W dalszej części artykułu przyjęto następujące nazewnictwo poszczególnych konfiguracji badanego silnika – warianty badawcze silnika przedstawiono w tabeli 3.

Warianty badawcze silnika spalinowego [1]

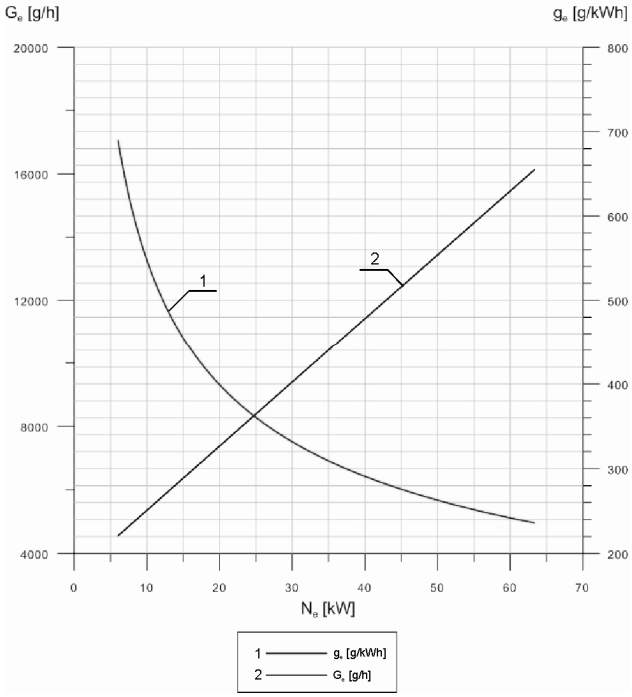
Tabela 3

Nazwa konfiguracji	Opis konfiguracji	Uwagi
Wariant podstawowy	1. Silnik spalinowy. 2. Filtr powietrza. 3. Elastyczny przewód odprowadzenia spalin.	–
Wariant pełny	1. Silnik spalinowy. 2. Filtr powietrza. 3. Układ dolotowy. 4. Układ wylotowy. 5. Elastyczny przewód odprowadzenia spalin.	Układ dolotowy kompletny. Układ wylotowy kompletny.



Rys.6. Zużycie paliwa podczas ustalonych parametrów pracy silnika [1]

Po sporządzeniu wykresów dla każdego z punktów pracy utworzona została charakterystyka godzinowego i jednostkowego zużycia paliwa.



Rys.7. Godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa

Po sporządzeniu wszystkich krzywych g_e dla danej konfiguracji sporządzono charakterystykę uniwersalną. Przeprowadzono również dwa cykle badań w celu określenia ilości substancji szkodliwych w spalinach. Badania przeprowadzono dla następujących punktów pracy silnika:

– zakres maksymalnego momentu obrotowego *n = 1500* [obr/min],
– zakres maksymalnego obciążenia *n = 2300* [obr/min].

Analizę składu spalin przeprowadzono metodą bezpośrednią za pomocą automatycznego analizatora Arcon Oliver K-4500 oraz miernika stopnia zaczernienia Bosch EFAW-68A.

3.2. Wyniki badań

Wyniki badań posłużyły do:

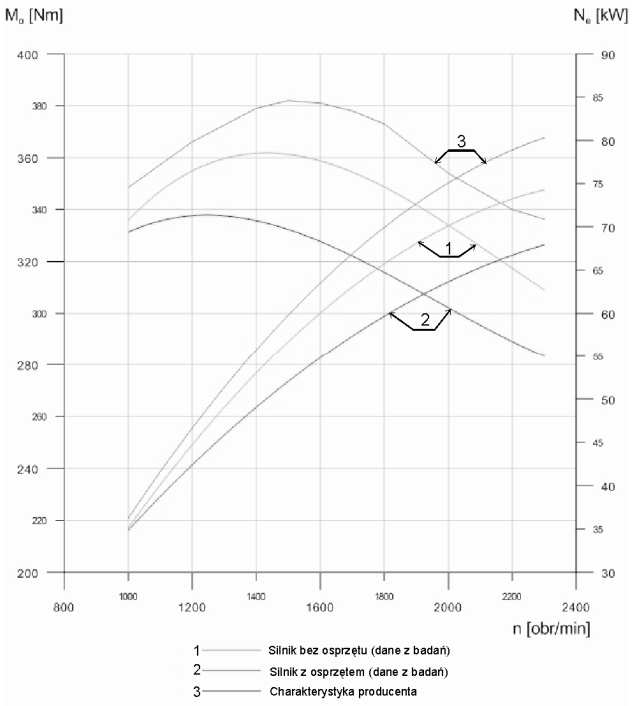
– określenia wpływu ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na parametry pracy silnika spalinowego,
– sporządzenia charakterystyk silnika dla poszczególnych wariantów badawczych,
– pozyskania danych o pracy silnika oraz jego osprzętu, istotnych w procesie projektowania, konstruowania i eksploatacji urządzeń z napędem spalinowym,
– zbadania wpływu ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na skład chemiczny spalin.

Podstawową graficzną ilustracją parametrów silnika spalinowego jest jego charakterystyka uniwersalna. Pozwala ona określić jednostkowe zużycie paliwa podczas pracy silnika z zadaną prędkością obrotową przy zadanym momencie obrotowym. Charakterystyka ta często jest rozszerzona o naniesione na nią dodatkowo krzywe stałej mocy, izotermy temperatury spalin oraz średnie ciśnienie użyteczne.

Przykładową charakterystykę uniwersalną utworzoną na podstawie danych z badań przedstawiono na rysunku 8.

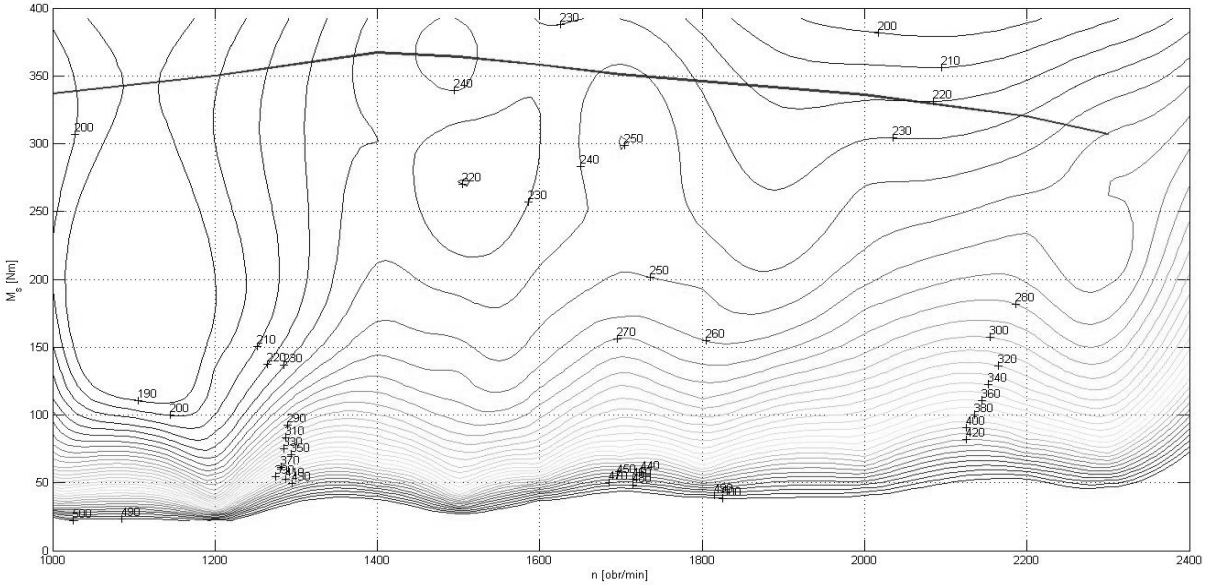
Zazwyczaj jednak producenci nie publikują tego typu charakterystyk, zastępując je tzw. charakterystykami zewnętrznymi. Jest to najczęściej wykres przebiegu wartości momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika oraz wykres przebiegu mocy rozwijanej przez silnik w funkcji jego prędkości obrotowej.

Na rysunku 9 pokazano uzyskane charakterystyki zewnętrzne silnika D5A T w odniesieniu do charakterystyki deklarowanej przez producenta.

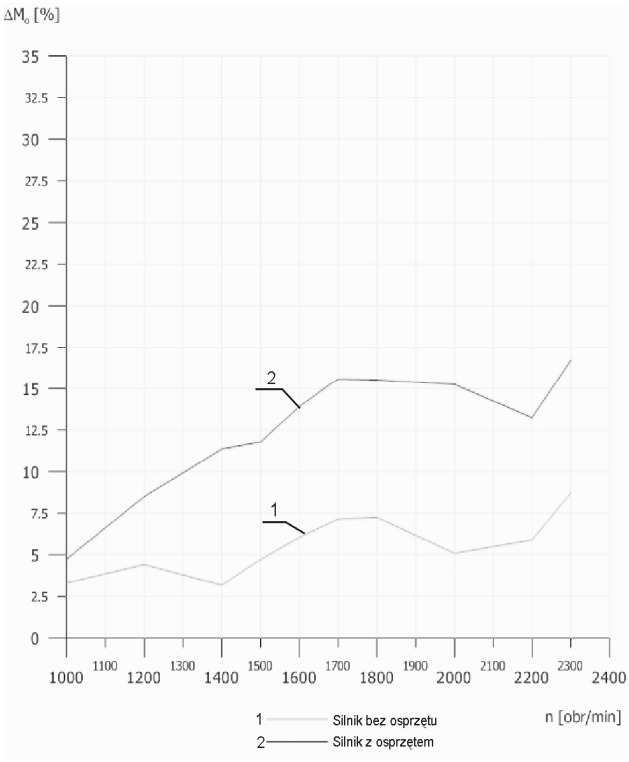


Rys.9. Charakterystyki zewnętrzne silnika D5A T [1, 12]

Procentowe różnice pomiędzy wartością momentu obrotowego dla poszczególnych konfiguracji, a wartościami deklarowanymi przez producenta pokazano na rysunku 10.

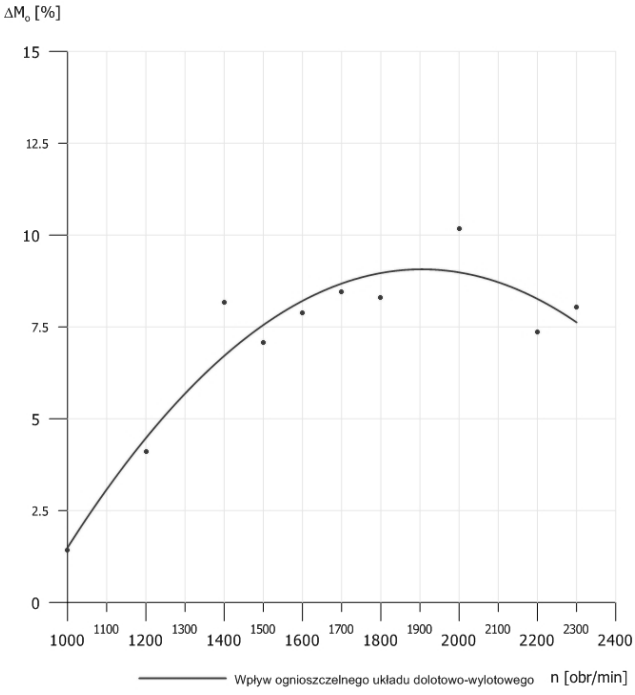


Rys.8. Charakterystyka uniwersalna silnika D5A T bez ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego



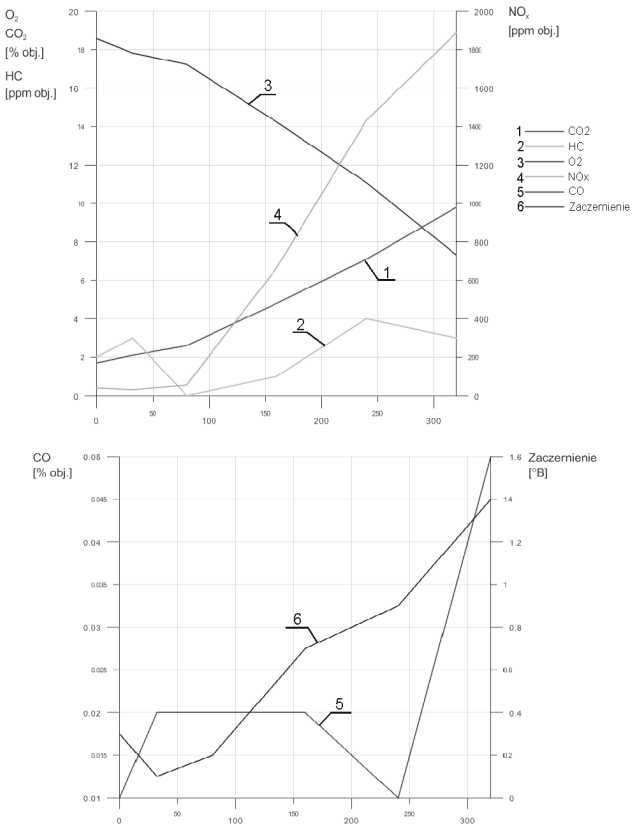
Rys.10. Procentowe zmiany wartości momentu obrotowego silnika D5A T w odniesieniu do wartości deklarowanych przez producenta [1, 12]

Wpływ ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na parametry pracy badanego silnika przedstawiono wykres na rysunku 11.



Rys.11. Wpływ ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego w wersji według rozwiązania KOMAG-u na parametry (moc, moment obrotowy) uzyskiwane przez silnik [1]

Przykładowe wyniki badań składu spalin przedstawiono na rysunku 12.



Rys.12. Ilość substancji szkodliwych w spalinach w funkcji obciążenia dla stałej prędkości obrotowej (*n = 1500* [obr/min]) – silnik bez ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego

3.3. Omówienie wyników badań

Ze względu na konieczność zastosowania przekładni redukującej obroty, a także brak możliwości przeniesienia punktu pomiaru momentu obrotowego na elementy obrotowe połączone z kołem zamachowym silnika, konieczne było uwzględnienie wpływu przekładni na wyniki. Sprawność pary kół walcowych, przy określonej liczbie zębów koła napędzającego literatura określa na $\eta = 0{,}97$ [2]. Uwzględniając fakt, iż przekładnia oparta była o oryginalne, wcześniej eksploatowane części, a podczas pracy stwierdzono wzrost jej temperatury, przyjęto sprawność $\eta = 0{,}9$.

Odnosząc wyniki uzyskane przez silnik bez osprzętu do danych deklarowanych przez producenta, a także uwzględniając straty mocy wynikające z zastosowania przekładni oraz wałów przegubowych, otrzymane wyniki badań można przyjąć za poprawne.

Krzywe mocy przedstawione na rysunku 9 stanowią aproksymację punktów pomiarowych opisaną wielomianem 2 stopnia, natomiast krzywe momentu obrotowego opisano za pomocą wielomianu stopnia 3.

Krzywa ilustrująca wpływ ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na pracę silnika (rys. 12) stanowi przybliżenie opisane wielomianem 2 stopnia.

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz w wyniku ich analizy można przyjąć, że ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy powoduje spadek parametrów silnika (moc, moment obrotowy) do 10% w stosunku do wartości deklarowanych przez producenta. Wpływ ten nie jest stały i rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej (dla pracy silnika przy pełnym dawkowaniu ilości paliwa).

Analiza składu chemicznego spalin wykazała, że charakter zmian udziału poszczególnych składników jest podobny zarówno dla silnika bez, jak i wyposażonego w ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy. Można zauważyć obniżenie ilości węglowodorów dla wariantu pełnego przy niewielkich obciążeniach oraz wzrost stopnia zaczernienia spalin i ilości CO. Pozostałe związki utrzymują się na niskich poziomach. Przyczynę takiego stanu rzeczy należy upatrywać w fakcie, iż silnik jest nową jednostką. Dla silnika w takim stanie technicznym uzyskane wyniki, zdaniem specjalistów w dziedzinie silników spalinowych, są bardzo dobre i zgodne z oczekiwaniami. Przeprowadzenie zaprezentowanego cyklu badań dla silnika innego typu oraz dla takiej samej jednostki jak opisana w niniejszym artykule, lecz po przepracowaniu określonej ilości motogodzin w warunkach eksploatacyjnych umożliwiłoby określenie wpływu eksploatacji na ilość substancji szkodliwych w spalinach.

Uzyskane wyniki wskazują na stosunkowo niewielki wpływ ognioszczelnego układu dolotowo-wylotowego na parametry osiągane przez silnik, niemniej jednak należy go uwzględnić podczas analiz i obliczeń trakcyjnych napędu.

Można natomiast zauważyć wzrost ilości węglowodorów podczas pracy silnika z prędkością obrotową $n = 1500$ obr/min i maksymalnym obciążeniu. Wzrasta również zadymienie spalin, zarówno dla prędkości $n = 1500$ obr/min, jak i $n = 2300$ obr/min.

Literatura

1. Grant promotorski GR57-11388 (prace własne).
2. Ochęduszko K.: Koła zębate. Konstrukcja, PWT, Warszawa 1959.
3. Siurek J.: Małotoksyczny napęd spalinowy dla górnictwa węglowego na bazie krajowego silnika seryjnego. Badania wstępne, opracowanie programu i metodyki badań, KOMAG, Gliwice 1978.
4. Ubysz A., Figlus T.: Ćwiczenia laboratoryjne z silników spalinowych i ochrony środowiska, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
5. Bernhardt M.: Badania trakcyjnych silników spalinowych, WKŁ, Warszawa 1970.
6. Rychter T., Teodorczyk A.: Teoria silników tłokowych, WKŁ, Warszawa 2006.
7. Drozd C., Sroka Z.J.: Silniki spalinowe – laboratorium, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
8. Dane techniczne silnika Volvo Penta D5A T

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Mgr inż. Zdzisław BUDZYŃSKI
Mgr inż. Bartosz POLNIK
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
Mgr inż. Tomasz GĄSIOR
Instytut Techników Innowacyjnych EMAG

Analiza porównawcza zastosowania napędu synchronicznego i asynchronicznego w górniczych lokomotywach akumulatorowych

S t r e s z c z e n i e

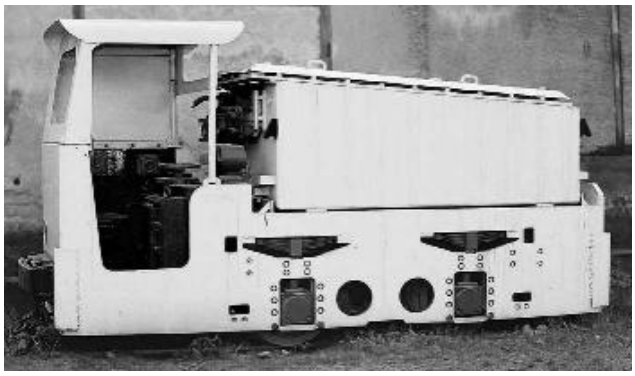
W artykule przedstawiono analizę porównawczą w zakresie zastosowania dwóch napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych – synchronicznego i asynchronicznego. Zaprezentowano wyniki badań stanowiskowych w aspekcie sprawności oraz możliwości rekuperacji energii zastosowanego synchronicznego i asynchronicznego silnika napędowego. Omówiono metodę prowadzenia badań, przedstawiono wyniki oraz analizy. Wskazano kierunki dalszego rozwoju napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych.

S u m m a r y

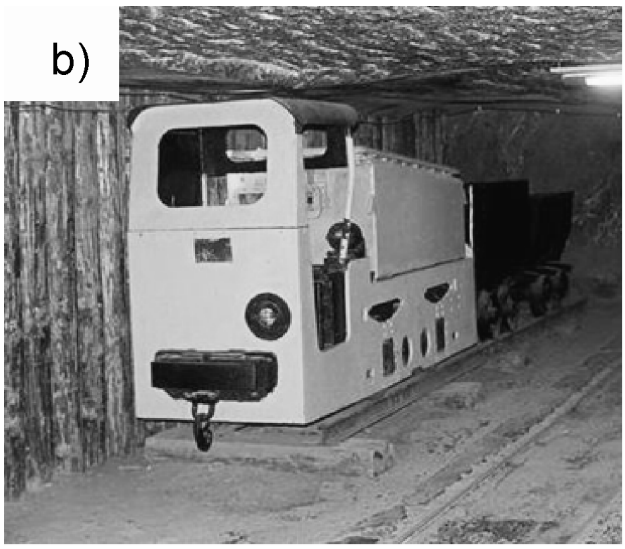
Comparative analysis as regards use of two drives in mine battery locomotives (synchronous and asynchronous) is presented in the paper. Results of stand tests in the aspect of efficiency and possibility of recuperation of energy of used synchronous and asynchronous motors are given. Method for conducting the tests is discussed and results and analyses are presented. Trends of further development of drives of mining battery locomotives are showed.

1. Wprowadzenie

W kopalniach węgla kamiennego oprócz lokomotyw przewodowych, zasilanych z elektrycznej sieci trakcyjnej stosowane są również lokomotywy z zasilaniem akumulatorowym. Początkowo przewidywane były tylko do przewozu pomocniczego w strefie przyprzodkowej wyrobisk korytarzowych. Szybko znalazły jednak zastosowanie również do przewozu w transporcie głównym [4]. Pierwsze rozwiązania lokomotyw akumulatorowych wyposażone były w skrzynię z baterią akumulatorową, ograniczającą zakres stosowania wyłącznie do wyrobisk ze stopniem niebezpieczeństwa wybuchu metanu „b". Opracowany oryginalny system przewietrzania baterii akumulatorów w osłonie siatkowej pozwolił na zastosowanie górniczych lokomotyw akumulatorowych w pomieszczeniach ze stopniem niebezpieczeństwa wybuchu metanu „c" [4]. Zasięg lokomotywy akumulatorowej ograniczony jest jednak pojemnością baterii akumulatorów. W celu jego zwiększenia stosowany jest tender z baterią dodatkową, która połączona jest z elektrowozem (ciągnikiem) przewodem oponowym [5]. Jak już wspomniano, górnicze lokomotywy akumulatorowe napędzane są silnikami elektrycznymi w wykonaniu przeciwwybuchowym. Podział lokomotyw akumulatorowych, z uwagi na zastosowany napęd, dokonywany jest w oparciu o liczbę zastosowanych jednostek napędowych (jednonapędowy lub dwunapędowy) oraz rodzaj zastosowanego napędu (silnik prądu stałego lub silnik indukcyjny). Krajowe rozwiązania górniczych lokomotyw akumulatorowych opierają się wyłącznie na napędach z silnikiem szeregowym prądu stałego. Są to lokomotywy typu Lea (przeważnie jednonapędowe) oraz Ldag (dwunapędowe) – rysunek 1 i rysunek 2.



Rys.1. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-5 [7]



Rys.2. Górnicze lokomotywy akumulatorowe produkcji polskiej [3] *a) Lea BM-12, b) Ldag 05M*

Prezentowane lokomotywy górnicze z napędem akumulatorowym były do tej pory jedynymi stosowanymi w przemyśle górniczym. Lokomotywy posiadają moc napędu od 8 do 20 KM, i osiągają prędkości do 7 km/h, a zużycie energii wynosi około 0,4 kWh na tonokilometr. Z początkiem XXI wieku, kiedy praktycznie zakończono produkcję polskich lokomotyw akumulatorowych, słowacka firma PHS Strojarne zaczęła produkować górnicze lokomotywy akumulatorowe serii AE – rysunek 3.

Rys.3. Górnicze lokomotywy akumulatorowe produkcji PHS Strojarne [3] *a) AE-30, b) AE-90*

Parametry techniczne wybranych górniczych lokomotyw akumulatorowych produkcji polskiej i słowackiej zestawiono w tabeli 1 [2, 4, 6].

Regulacja prędkości w starszych rozwiązaniach odbywa się za pomocą rezystorów rozruchowych. W nowszych rozwiązaniach takich jak np. Lea BM-12T/M regulacja prędkości odbywa się za pomocą łącznika tyrystorowego poprzez regulację prądu wzbudzenia silnika. Zmiana kierunku wirowania silnika realizowana jest za pomocą dwóch styczników zmieniających kierunek przepływu prądu w obwodzie wirnika. W lokomotywie Ldag 05M sterowanie prędkością odbywa się za pomocą łącznika tranzystorowego składającego się z dwóch bloków tranzystorów IGBT. W rozwiązaniach słowackich firmy PHS Strojarne stosowane są silniki asynchroniczne, a do regulowania prędkości lokomotywy stosuje się przemiennik częstotliwości, zapewniający płynną jazdę oraz hamowanie [2]. Górnicze lokomotywy akumulatorowe posiadają również zdolność rekuperacji energii i doładowywania baterii akumulatorów w czasie hamowania silnikiem elektrycznym.

2. Przedmiot analizy

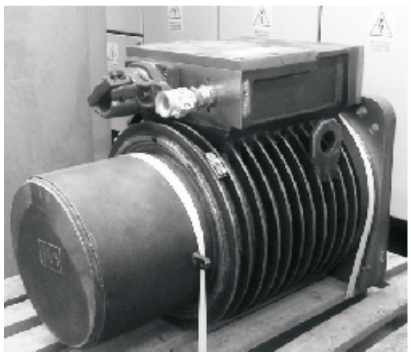
Przedmiotem analizy porównawczej był innowacyjny napęd górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea

Tabela 1

	Ldag 05M	Lea BM-5	Lea BM-12	AE-30	AE-90
Moc [kW]	11	12,5	15,2(38)	15	45
Rodzaj napędu	Silnik szeregowy prądu stałego	Silnik szeregowy prądu stałego	Silnik szeregowy prądu stałego	Silnik indukcyjny	Silnik indukcyjny
liczba napędów	2	2	1	2	2
Siła pociągowa [kN]	5,3	7	16,8	14	42
Prędkość [km/h]	7,2	6	8	-	-
Prędkość max. [km/h]	14,4	12	16	-	-
Napięcie baterii [V]	84	84	144	332	332
Pojemność baterii [Ah]	420	420	760	225	620
Masa [ton]	5	5	12	6	17

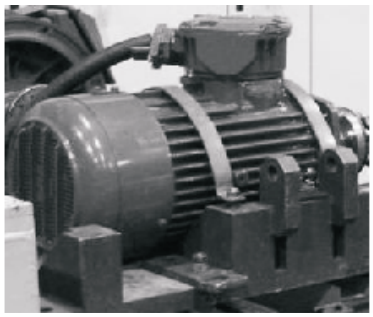
BM-12, wykonany w ramach projektu badawczo-rozwojowego p.t. „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej" finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz układ napędowy wybrany z dotychczas stosowanych w górniczych lokomotywach akumulatorowych serii AE. Głównym elementem innowacyjnego napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12 [1] jest silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMwsd 200 S-4 (rys. 4) w wykonaniu przeciwwybuchowym. W skład analizowanego układu napędowego wchodzi również moduł przekształtników typu MPE-1, w wykonaniu przciwwybuchowym, w którym znajdują się falowniki napięcia wraz z urządzeniami kontrolno-pomiarowymi oraz moduł baterii akumulatorów typu MBA-1 w wykonaniu przeciwwybuchowym, służący do zasilania całego napędu lokomotywy Lea BM-12.

Drugim analizowanym napędem był napęd górniczej lokomotywy akumulatorowej typu AE-44 słowackiego producenta PHS Strojarne. Podobnie jak w przypadku pierwszego napędu i tu głównym elementem układu napędowego jest silnik asynchroniczny typu dSkg 180L4-EP-f (rys. 5). Pozostałe elementy analizowanego układu napędowego, takie jak moduł przekształtników, czy moduł baterii akumulatorów pozostały bez zmian.



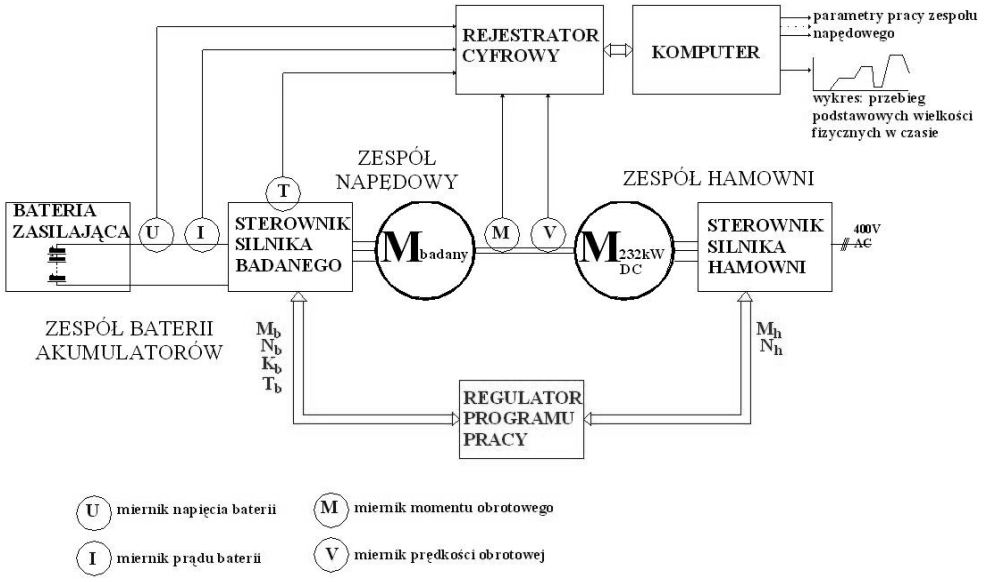
Napięcie znamionowe	88V
Moc znamionowa	18kW
Rodzaj pracy	S1
Częstotliwość znamionowa	50Hz
Prąd znamionowy	140A
Sprawność	91,6%
Prędkość obrotowa	1500obr/min
Moment znamionowy	115Nm
Masa silnika	360kg

Rys.4. Silnik PMSM typu SMwsd 200 S-4, wraz z podstawowymi parametrami technicznymi [1]



Napięcie znamionowe	105V
Moc znamionowa	22kW
Rodzaj pracy	S1
Częstotliwość znamionowa	50Hz
Prąd znamionowy	151A
Sprawność	90%
Prędkość obrotowa	1467obr/min
Moment znamionowy	143Nm
Masa silnika	222kg

Rys.5. Silnik indukcyjny typu dSkg 180L4-EP-f wraz z podstawowymi parametrami technicznymi [3]



Rys.6. Schemat stanowiska badawczego [1]

3. Metoda badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym zbudowanym w KOMAG-u. Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 6.

Stanowisko badawcze złożone było z dwóch podstawowych zespołów: napędowego oraz hamowni, sprzężonych ze sobą mechanicznie za pośrednictwem wału Cardana. W skład zespołu napędowego wchodził badany silnik elektryczny, zasilany z baterii akumulatorów poprzez przekształtnik energoelektroniczny. Zespół hamowni składał się z silnika prądu stałego (hamowni) zasilanego z sieci trójfazowej poprzez falownik napięcia. Układy sterowania obydwu silników sprzężone były ze sobą poprzez programowalny regulator, stanowiący główne urządzenie sterujące całym stanowiskiem badawczym. Układ pomiarowy wyposażony był w cyfrowy rejestrator sygnałów, który gromadził wyniki pomiarów przesyłane z czujników pomiarowych zastosowanych w układzie, po czym przesyłał je do komputera gdzie były analizowane i prezentowane w postaci numerycznej bądź graficznej. Sterowanie układem badawczym realizowano w oparciu zamodelowany cykl pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej (rys. 7), który powstał na podstawie rzeczywistego cyklu pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej na jednej z kopalń.

Ze względu na właściwości dynamiczne zespołu napędowego lokomotywy połączonego z hamownią, ograniczono zadawanie prędkości w pierwszej części cyklu pracy do 90% prędkości nominalnej oraz ograniczono napędowy moment obrotowy w pierwszej części cyklu pracy do jego 90% wartości nominalnej. Kierunek obrotów i tryb pracy był nadzorowany przez sterownik silnika hamowni, na podstawie zadanych parametrów.

W trakcie realizacji badań obydwa silniki pracowały w odrębnych trybach pracy:

- podczas pracy silnika badanego w trybie silnikowym, silnik hamowni pracował w trybie pracy prądnicowej, oddając energię do sieci zasilającej 400 V AC,
- podczas pracy silnika badanego w trybie prądnicowym, silnik hamowni pracował w trybie pracy silnikowej, a badany zespół napędowy oddawał energię do zasilającego go zespołu akumulatorów.

Układ pomiarowy pracował w trybie „on line" i rejestrował następujące wielkości:

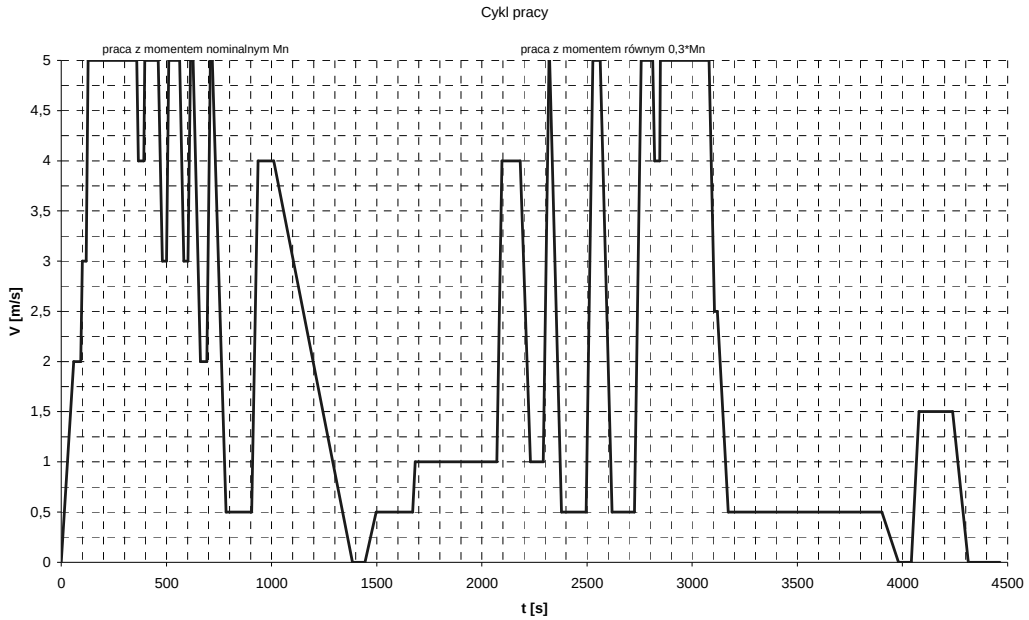
- napięcie zasilania zespołu napędowego,
- prąd pobierany z akumulatora,
- moment obrotowy na wale Cardana
- prędkość obrotowa silników,
- temperatura wybranych podzespołów sterownika silnika zespołu badanego.

Przetwarzanie wyników pomiarów następowało w trybie „off line" i pozwoliło na wyznaczenie:

- sprawności badanego zespołu napędowego,
- energii pobranej z akumulatora w zadanym cyklu pracy,
- energii oddanej do akumulatora w zadanym cyklu pracy,
- procentowego odzysku energii w zadanym cyklu pracy.

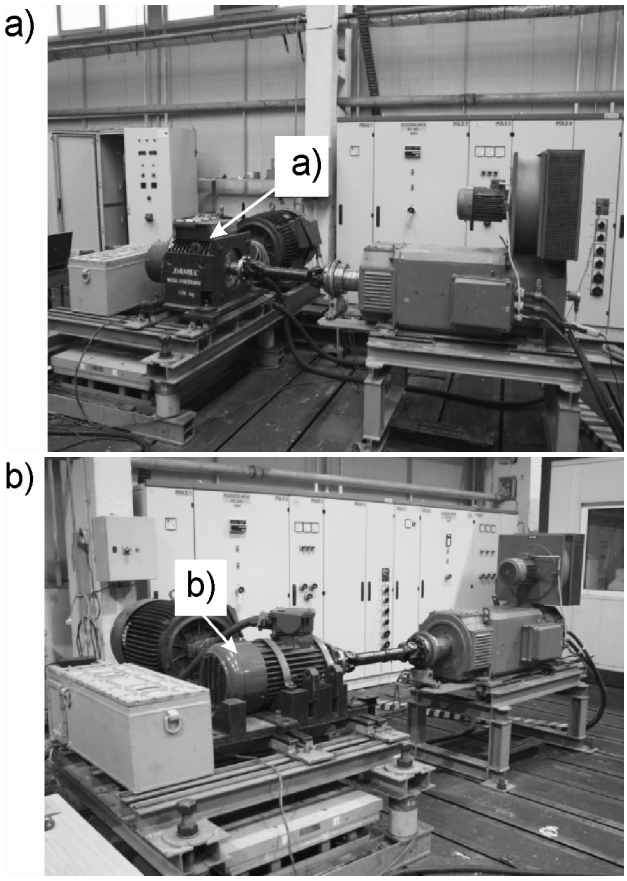
4. Badania stanowiskowe

Przeprowadzone badania, dwóch napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych, składały się z serii



Rys.7. Zamodelowany cykl pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej [2]

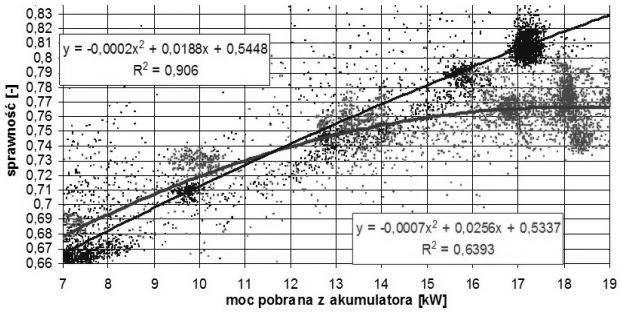
sześciu powtarzalnych cykli pracy (rys. 7). Zgromadzone podczas badań wyniki posłużyły do analizy porównawczej sprawności silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i silnika asynchronicznego. Ponadto analizowano również odzysk energii podczas hamowania silnikiem elektrycznym. Stanowisko badawcze nie ulegało zmianie, a jedynie dokonywano zamiany badanego silnika napędowego. Przyjęto zatem założenie, że sprawność układu napędowego, bez silnika, nie zmieniała się. W dalszej analizie określano zatem, który z zastosowanych silników napędowych charakteryzuje się lepszą sprawnością. Na rysunku 8 pokazano stanowisko badawcze z badanymi silnikami (a i b).



Rys.8. Stanowisko badawcze [7]
a – silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMwsd 200 S-4,
b – silnik asynchroniczny typu dSkg 180L4-EP-f

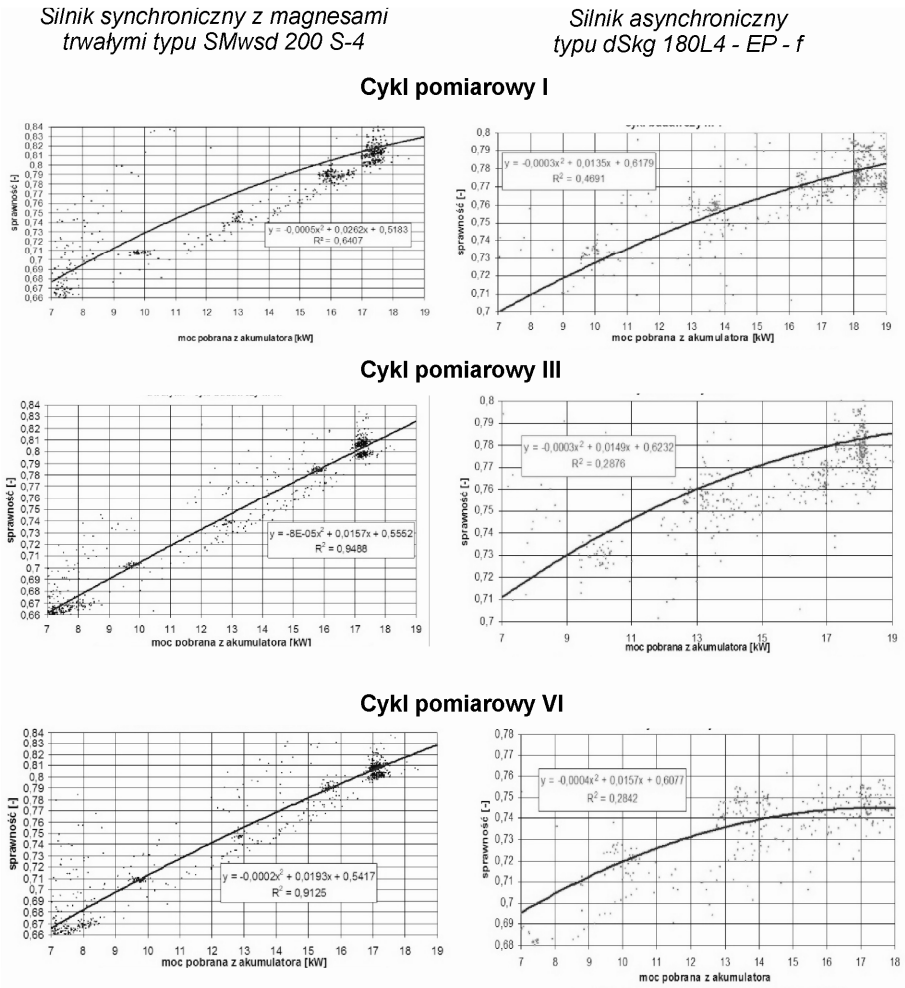
Zastosowanie silników napędowych o zbliżonych parametrach, zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych, pozwoliło na bardzo dokładne odzwierciedlenie rzeczywistego cyklu pracy w warunkach laboratoryjnych. Zmierzone podczas prób parametry silników, takie jak: moment elektromagnetyczny, prędkość obrotowa, prąd i napięcie posłużyły do wyznaczenia sprawności badanych napędów oraz ich zużycia energii, a tym samym w dalszej kolejności dokonania ich analizy porównawczej. Wyniki uzyskanych wartości sprawności badanych napędów elektrycznych dla wybranych cyklów pomiarowych [3], zestawiono na rysunku 10.

W celu porównania sprawności zastosowanych napędów elektrycznych górniczej lokomotywy akumulatorowej, zestawiono na jednej płaszczyźnie dwa przebiegi sprawności badanego układu napędowego w funkcji mocy pobieranej z baterii akumulatorów (rys. 9). Sumaryczną sprawność każdego z badanych silników wyznaczono analitycznie (sprawność podczas wszystkich sześciu cykli pomiarowych). Kolor niebieski prezentuje wyniki dla silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, zaś kolor czerwony reprezentuje wyniki dla silnika asynchronicznego.

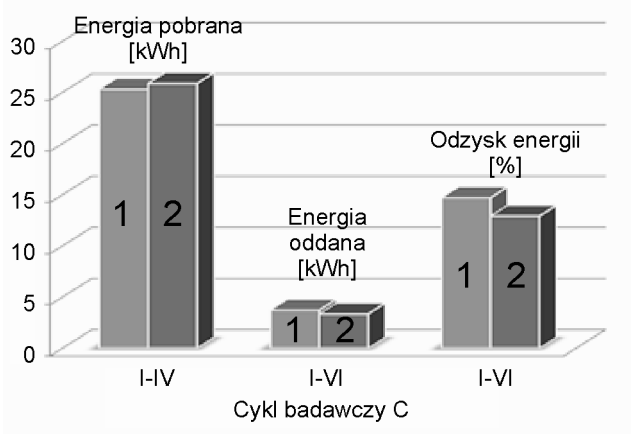


Rys. 9. Przebiegi sprawności układu napędowego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi typu SMwsd 200 S-4 (górny) oraz układu napędowego z silnikiem asynchronicznym typu dSkg 180L4-EP-f (dolny) w funkcji mocy pobieranej z akumulatora podczas cykli pomiarowych I – VI [3]

Z wykresów pokazanych na rysunku 9 wynika, że na poziomie obciążenia znamionowego, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMwsd 200 S-4 ma sprawność 10% większą niż silnik asynchroniczny typu dSkg 180L4-EP-f. Zbliżone wartości sprawności, na poziomie 0,02% różnicy obserwuje się w obszarze pracy, gdzie silniki są obciążone poniżej połowy obciążenia znamionowego. Wykres z rysunku 9 jest bardzo istotny z punktu widzenia użytkownika górniczej lokomotywy akumulatorowej. Pokazuje o ile dłużej można eksploatować lokomotywę podczas jednej zmiany, stosując nowoczesny napęd z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. Z analizy porównawczej procentowego odzysku energii (rys. 11) składającego się z energii pobranej z akumulatora oraz energii oddanej do źródła zasilania, widać że dwa silniki o zbliżonych gabarytach oraz o porównywalnej sprawności podawanej przez producenta silników, podczas badań w układzie napędowym stanowiska badawczego znacząco różniły się w funkcji zużycia energii. Silnik asynchroniczny pobierał podczas badań więcej energii niż był w stanie oddać do baterii akumulatorów, odwrotnie zaś silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, cechował się mniejszym poborem energii z akumulatorów, a większym zwrotem energii do źródła zasilającego. Sumarycznie wynik ten pozwolił określić różnicę w procentowym odzysku energii, pomiędzy silnikiem typu SMwsd 200 S-4 (numer 1 na rys.11) a silnikiem typu dSkg 180L4-EP-f (numer 2 na rys.11). Różnica ta wyniosła 3% na korzyść silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.



Rys.10. Zestawienie uzyskanych sprawności podczas wybranych cykli pomiarowych



Rys. 11. Analiza porównawcza wyników badań.
Energia pobrana, energia oddana, odzysk energii w funkcji cyklu badawczego [3]

5. Podsumowanie

Prace badawcze miały na celu porównanie sprawności i odzysku energii dwóch napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych. Badano stosowany obecnie napęd w słowackich lokomotywach z serii AE z silnikiem asynchroniczny typu dSkg 180L4-EP-f oraz jako alternatywę napęd z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi typu SMwsd 200 S-4, którego nie stosowano dotychczas w lokomotywach górniczych. Kluczowym kryterium badawczym było zapewnienie takich samych parametrów obciążenia podczas realizowanego cyklu pracy układu napędowego. Uzyskano to dzięki inteligentnemu systemowi sterowania, którego nadrzędnym elementem był regulator programowalny. Zarówno silnik asynchroniczny, jak i synchroniczny z magnesami trwałymi współpracował z tymi samymi urządzeniami stanowiska badawczego

i z takimi samymi parametrami w zakresie prędkości i mocy. Sprawność energetyczna stanowiska badawczego była więc taka sama podczas badania napędu z silnikiem typu SMwsd 200 S-4, jak i napędu z silnikiem typu dSkg 180L4-EP-f. Dzięki temu można było dokładnie określić sprawność całego układu napędowego w zależności od zastosowanego silnika napędowego. Analiza porównawcza wyników badań jednoznacznie pokazała, przewagę rozwiązania z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi nad klasycznym układem napędowym z silnikiem indukcyjnym dotychczas stosowanym w górniczych lokomotywach akumulatorowych.

Przeprowadzona analiza rynku, a także analiza literaturowa w zakresie górniczych lokomotyw akumulatorowych, a następnie przeprowadzone badania stanowiskowe w sposób jednoznaczny określają kierunek rozwoju napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych. Stosowane w pierwszych rozwiązaniach lokomotyw akumulatorowych silniki szeregowe prądu stałego zostały wyparte przez układy napędowe z silnikami asynchronicznymi i przestały być produkowane. Obecnie są jedynie remontowane. Rozwój maszyn elektrycznych, a przede wszystkim układów energoelektronicznych (przemienników częstotliwości, falowników) pozwala obecnie na stosowanie w układach napędowych górniczych lokomotyw akumulatorowych nowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Właściwości zarówno mechaniczne, jak i elektryczne, przy porównywalnych kosztach zainstalowania, wskazują, że w najbliższej przyszłości należy spodziewać się wzrostu zastosowań tego typu silników napędowych w górniczych lokomotywach akumulatorowych.

Literatura

1. Budzyński Z., Gąsior S., Niedworok A., Polnik B.: Badania wybranych rozwiązań napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe nr 91-3/2011, s.9. Wydaw. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL, ISSN 0239-3646.
2. Budzyński Z., Polnik B.: Mechatroniczny układ sterowania i napędu akumulatorowych kolei szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej. Maszyny Górnicze nr 2/2011.
3. Polnik B.: Badania wybranych konfiguracji napędów górniczej lokomotywy akumulatorowe - Praca dyplomowa magisterska. Gliwice 2011.
4. Gluziński W.: Elektryfikacja podziemi kopalń węgla – Część 2 urządzenia i sieci niskiego napięcia. Wydaw. „Śląsk” 1985r.
5. Poradnik górnika – tom 3. Wydaw. „Śląsk” 1974 r.
6. PN-89/G-46802 Lokomotywy kopalniane podziemne. Lokomotywy elektryczne akumulatorowe – podstawowe parametry.
7. Materiały własne KOMAG-u.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

J. A. MISZANSKIJ
PAO „DTEK Pawłogradugol"

Efektywne wykorzystywanie energii elektrycznej w systemach zasilania kopalń węgla

S t r e s z c z e n i e

W artykule omówiono program działań na rzecz oszczędzania energii w kopalniach ukraińskich, obejmujący trzy etapy: ewidencję nośników energii na wszystkich poziomach dystrybucji energii, racjonalne zużycie energii elektrycznej i cieplnej oraz zastosowanie energooszczędnych urządzeń i technologii.

S u m m a r y

Actions program for the energy saving in Ukrainian mines including three stages: record of energy carriers at all levels of energy distribution, rational use of electric and thermal energy as well as use of energy saving machines and technologies, is discussed in the paper.

1. Wprowadzenie

Norma poboru energii elektrycznej dla wyprodukowania jednej tony węgla na Ukrainie wynosi obecnie 120 kWh. Najniższe zużycie – 30 kWh na tonę węgla udało się osiągnąć w „DTEK Pawłogradugol". Stało się to możliwe dzięki wdrożeniu programu zwiększenia efektywności wydobycia węgla. Jednym z elementów tego programu jest oszczędne gospodarowanie zasobami energetycznymi i systemowe podejście do opracowania energooszczędnych rozwiązań w systemach poboru energii, co pozwoliło na efektywniejsze wykorzystywanie zasobów energetycznych.

Program skutecznych działań na rzecz oszczędzania energii składa się z trzech głównych etapów: ewidencji nośników energii na wszystkich poziomach dystrybucji energii, racjonalne zużycie energii elektrycznej i cieplnej i zastosowanie energooszczędnych urządzeń i technologii.

Na kompleksowy program oszczędnego gospodarowania energią składają się działania, ukierunkowane na zmniejszenie zapotrzebowania na energię, a mianowicie środki organizacyjno-techniczne i zastosowanie nowych energooszczędnych rozwiązań. Drugi kierunek to zmniejszenie kosztów energii elektrycznej, co osiąga się dzięki uregulowaniu harmonogramów obciążeń energetycznych kopalni i ograniczeniu poboru energii elektrycznej w godzinach maksymalnego obciążenia systemu energetycznego.

Przedstawiony program jest aktywnie realizowany w kopalniach „DTEK Pawłogradugol". W pierwszym półroczu 2011 roku zużycie energii zostało obniżone o 5,5 mln kWh, co stanowi równowartość kwoty 4,2 mln hrywien (378 300 euro). Dzięki opracowaniu harmonogramu obciążeń elektrycznych i przesunięciu zużycia na godziny nocne i pozaszczytowe udało się zaoszczędzić 7,2 mln hrywien (648 500 euro). Realizacja działań skierowanych na racjonalizację zużycia energii cieplnej pozwoliła zaoszczędzić 1200 Gcal.

Obecnie „DTEK Pawłogradugol" opracowuje również nowy kierunek wykorzystywania energii pochodzącej z wiatru, wody kopalnianej oraz metanu. Technologie te nie tylko pozwolą na efektywne wykorzystanie własnych zasobów kopalni, ale także mogą stać się podstawą do projektowania nowych zakładów.

Zmniejszenie zużycia energii w kopalniach węgla kamiennego poprzez zarządzanie przepływem ładunków transportem przenośnikowym stało się możliwe dzięki wdrożeniu przemienników częstotliwości, które są szeroko stosowane. Opracowania naukowe z tego obszaru, zakładają możliwość obniżenia zużycia energii o 30%, z czego zużycie energii elektrycznej przez transport przenośnikowy może stanowić 15% w ogólnej strukturze zużycia produkcyjnego.

Warto dodatkowo podkreślić iż, ww. energooszczędny tryb pracy pozwala także na wydłużenie okresu użytkowania taśm przenośników i krążników. Zastosowanie przemiennika częstotliwości pozwala automatycznie zmieniać prędkość ruchu taśmy, w zależności od wielkości załadunku i eliminować jałowy przebieg przenośnika.

Przenośnik z przeciwwybuchowym przemiennikiem częstotliwości typu ПЧВ-К działa już w kopalni im. Bohaterów Kosmosu. Działający system monitoringu on line pozwala na: śledzenie przepływu ładunków, zużycia energii elektrycznej, kontrolę parametrów technologicznych przenośnika oraz rejestrację awarii urządzeń elektrycznych. Zastosowana aparatura umożliwia ustalenie prędkości minimalnej przenośnika na poziomie 20% prędkości znamionowej, co odpowiada częstotliwości przetwornika 10 Hz. Obecnie dozór kopalni ustalił prędkość minimalną na poziomie 40% prędkości znamionowej (20 Hz), natomiast przy maksymalnym przepływie ładunków prędkość automatycznie zwiększa się do 80% (40 Hz).

Zainstalowanie przemienników częstotliwości na przenośnikach pozwala na oszczędzanie energii i zasobów:

- przy obciążeniu minimalnym przenośnika zużycie energii elektrycznej zmniejsza się 2,5-krotnie,
- przy obciążeniu maksymalnym przenośnika zużycie energii elektrycznej jest 1,6 razy mniejsze,
- moc silników i przemiennika częstotliwości może zostać obniżona o 40%,
- w celu zwiększenia wskaźników oszczędności energii elektrycznej należy obniżać prędkość minimalną przenośnika do poziomu, wykluczającego możliwość przeładowania w przypadku gwałtownego zwiększenia obciążenia,
- z uwagi na fakt, że przenośniki taśmowe i ich podzespoły zużywają do 70% energii elektrycznej, ograniczenie zużycia energii elektrycznej ma istotne znaczenie w perspektywie.

Zarządzanie kopalnianym systemem zużycia wody pozwala na oszczędność rzędu 1,5 mln hrywien rocznie w jednej kopalni. Badania nad możliwością zwiększenia efektywności energetycznej tego energochłonnego procesu trwają obecnie w kopalni im. N.I. Staszkowa. Projekt bazuje na monitoringu pomp. Zautomatyzowany układ sam wybiera pompy, które trzeba włączyć w celu zapewnienia jak największej sprawności w danej strefie taryfowej opłat za energię elektryczną i odpowiedniego zużycia wody.

Zdecydowanym krokiem w kierunku oszczędności energii elektrycznej w systemach zaopatrzenia kopalni węgla w energię, mogą stać się działania na rzecz zapewnienia zgodności elektromagnetycznej i polepszenia jakości napięcia.

2. Problem zastosowania przetworników

Na pierwszy rzut oka wydaje się, że występuje sprzeczność podejść, ponieważ instalacja przemienników częstotliwości na przenośnikach, maszynach wyciągowych i wentylatorach w sposób nieunikniony prowadzi do pogorszenia jakości napięcia, w pierwszym rzędzie pod względem zniekształcenia przebiegu sinusoidalnego.

Rozwiązaniem problemu może być poszukiwanie efektywnych, pod względem energetycznym trybów pracy kompleksów technologicznych oraz zastosowanie specjalnych urządzeń filtrująco-kompensujących (UFK). Analizując możliwe sposoby oszczędzania energii elektrycznej przy utrzymaniu kwestii jakości napięcia widać, że podczas pracy przemienników częstotliwości są generowane wyższe harmoniczne prądu i napięcia w sieci zasilającej. Wyższe harmoniczne w sieciach elektrycznych są niepożądane, wpływają na stan techniczny urządzeń elektrycznych i powodują dodatkowe straty mocy i energii, pogarszające tryb cieplny urządzeń elektrycznych oraz komplikują kompensację mocy reaktywnej za pomocą baterii kondensatorów statycznych. W ten sposób skraca się okres użytkowania maszyn i urządzeń elektrycznych z powodu przyspieszonego zużycia izolacji. Pojawiają się przerwy w pracy urządzeń automatyki systemowej i sieciowej, środków telemechanicznych [2, 3].

Wyższe harmoniczne są niejawne i mają efekt kumulujący, dlatego ich oddziaływanie w postaci zniszczenia izolacji i kabli maszyn elektrycznych ujawniają się po pewnym czasie. Zniekształcenie krzywej napięcia wpływa na powstanie i trwanie procesów jonizacyjnych w izolacji. W przypadku obecności wyższych harmonicznych w krzywej napięcia proces zużycia izolacji staje się bardziej intensywny, szczególnie w kablach i kondensatorach. Niektóre źródła twierdzą, że w przypadku wartości wyższych harmonicznych na poziomie 5%, po dwóch latach użytkowania $tg\delta$ kondensatorów zwiększa się dwukrotnie. Gdy prąd wyższych harmonicznych przepływa przez elementy sieci i urządzeń elektrycznych użytkowników, występują dodatkowe straty mocy aktywnej i energii elektrycznej [4].

Największe straty mocy czynnej spowodowane wyższymi harmonicznymi są obserwowane w transformatorach, silnikach, generatorach, powietrznych i kablowych elektroenergetycznych liniach przesyłowych. Zwiększenie czynnej rezystancji wymienionych elementów, wraz ze zwiększeniem częstotliwości jest prawie proporcjonalne do danej harmonicznej [2].

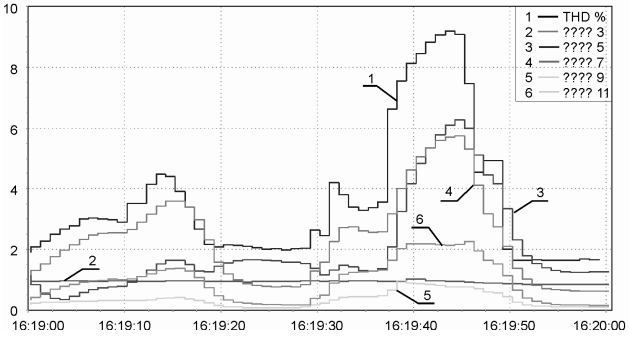
W niektórych przypadkach dodatkowe straty mogą doprowadzić do przegrzania i awarii urządzeń elektrycznych. Wartość dodatkowych strat mocy czynnej jest uwarunkowana trybem pracy urządzeń elektrycznych i poziomem wyższych harmonicznych w sieci.

Analiza pomiarów, prowadzonych w warunkach rzeczywistych pozwala ustalić związek między parametrami jakości napięcia, a cyklicznymi trybami pracy maszyn wyciągowych. Dowodzi tego przykład, transportu pionowego węgla systemem „kaskada asynchroniczna tyrystorowa" o mocy 2 × 800 kW (PSP Kopalnia Stiepnaja).

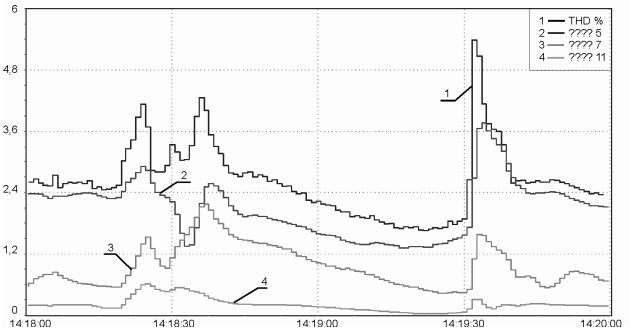
Cykl transportu pionowego węgla w zestawieniu ze zmianami parametrów jakości energii elektrycznej dla fazy *L1* został przedstawiony na rysunku 1 (Przykładowy fragment 16.19–16.20) dowodzi, że transport pionowy węgla jest źródłem prawie wszystkich harmonicznych, (25 - w tym parzystych). Szczególnie znaczący poziom w cyklu transportu pionowego węgla, mają harmoniczne rzędu 5, 7, 9, 11, 13, 17 i 19. Wartość maksymalna współczynnika zniekształcenia sinusoidalności K_U (THD) wynosi powyżej 9%, co jest niedopuszczalne z uwagi na standardy EIC [1].

W przypadku transportu pionowego z użyciem systemu EKPC o mocy 800 kW (silnik prądu stałego), cykl zmiany parametrów jakości energii elektrycznej dla fazy *L1* pokazano na rysunku 2. Przykładowy fragment 14.18.15–14.19.50 potwierdza, iż napęd maszyny

wyciągowej jest źródłem harmonicznych charakterystycznych dla przetwornika sześciofazowego: rzędu 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 i 25. Wartość maksymalna K_U w cyklu transportu pionowego przekracza 5%.



Rys.1. Wartości wyższych harmonicznych napięcia w ciągu cyklu transportu pionowego



Rys.2. Wartości wyższych harmonicznych napięcia w ciągu cyklu transportu pionowego

W celu oszacowania negatywnych skutków związanych z pogorszeniem parametrów jakości napięcia, należy obliczyć dodatkowe straty w transformatorach zasilających i rozdzielczych oraz w liniach przesyłowych.

Obliczenia instalacji wentylatorów z automatyczną kompensacją temperatury wykazują znaczne zwiększenie strat mocy i energii w elementach systemu zasilania. Problem ten można częściowo rozwiązać za pomocą UFK. Jednak całkowita kompensacja wyższych harmonicznych nie jest możliwa z powodu wysokiego poziomu harmonicznych rzędu 17, 19 i 23, charakterystycznych dla kaskad tyrystorowych.

Analiza powyższego prowadzi do wniosku, że zgodność elektromagnetyczna urządzeń pobierających energię elektryczną w kopalniach „DTEK Pawłogradugol" i systemu energetycznego została naruszona z powodu pogorszenia parametrów jakości napięcia (zniekształcenie przebiegu sinusoidalnego i jej niesymetryczności). Uwzględniając perspektywę dalszego wdrażania przemienników częstotliwości w innych kopalniach „DTEK Pawłogradugol", należy określić możliwe sposoby rozwiązania danego problemu.

Najbardziej skutecznym środkiem zaradczym w przypadku zniekształcenia przebiegu sinusoidalnego napięcia zasilającego, jest metoda polegająca na dokładnym zbadaniu wszystkich możliwych trybów pracy urządzeń elektrycznych z przetwornicami zaporowymi oraz na wyłączeniu z pracy takich trybów, które powodują największe zniekształcenie sinusoidy. Jeżeli zastosowanie takiej metody będzie ograniczone ze względów technologicznych, ekologicznych lub ze względów bezpieczeństwa, stosowane będzie specjalne urządzenie kompensujące dla określonych częstotliwości. Pomiary i obliczenia potwierdzają, że w warunkach kopalń „DTEK Pawłogradugol" w spektrum częstotliwości przeważają wyższe harmoniczne rzędu 5 i 7.

Kolejnym wariantem rozwiązania danego problemu może być zmiana układu zasilania w celu zwiększenia mocy zwarciowej i oddzielenia elektrycznie „czystych" odbiorników energii elektrycznej od odbiorników z przetwornicami zaporowymi, w tym:

- zamiana transformatorów siłowych na transformatory o większej mocy (wariant nie do przyjęcia, ponieważ obecnie w bloku numer 2 transformatory siłowe nie są w pełni obciążone);
- zastosowanie podwójnych reaktorów, dla podłączenia przyłączy wentylatorów głównych z automatyczną kompensacją temperatury, do odrębnego układu szyn zbiorczych.

3. Wnioski

Zwiększenie efektywności wykorzystania energii elektrycznej w transporcie przenośnikowym jest osiągane dzięki zastosowaniu przemienników częstotliwości, umożliwiających regulowanie prędkości transportu obrotów w zależności od strumienia przepływu ładunków.

Działania związane z uregulowaniem harmonogramu obciążeń elektrycznych kopalni są skierowane na przesunięcie obciążeń na godziny nocne i pozaszczytowe, co pozwala na znaczną oszczędność energii elektrycznej.

Po zainstalowaniu przemienników częstotliwości w różnych kompleksach technologicznych kopalni (wentylatory główne, transport przenośnikowy, maszyny wyciągowe) zaobserwowano pogorszenie się jakości napięcia. Konieczne jest zatem opracowanie działań zmierzających do przestawienia kopalni na nowe, efektywne pod względem energetycznym tryby pracy pod warunkiem zainstalowania urządzeń filtrująco-kompensujących dla określonego spektrum.

Literatura

1. Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC. OJ L 176.15.07.2003, p. 37-55.

2. Żeżelenko I. W.: Wyższe harmoniczne w systemach zaopatrzenia w energię elektryczną zakładów przemysłowych. – wyd. 5, popr. i uzup. – Moskwa: Energoatomizdat, 2004. – 358 s., il. 141.
3. Szczególne tryby pracy sieci elektrycznych: Podręcznik początkowy G.G. Piwniak, A.K. Szydłowskij, G.A. Kigiel, A.J. Rybałko, O.I. Chowańska. – D.: Narodowy Uniwersytet Górniczy, 2009. – 376 s.
4. Zgodność elektromagnetyczna w systemach zaopatrzenia w energię elektryczną: Podręcznik I.W. Żeżelenko, A.K. Szydłowskij, G.G. Piwniak, J.Ł. Sajenko. – D.:Narodowy Uniwersytet Górniczy, 2009. – 319 s.: il.

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.

Dr inż. Dariusz MICHALAK
Mgr inż. Radosław LESISZ
Mgr inż. Łukasz JASZCZYK
Dr inż. Magdalena ROZMUS
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Repozytorium zdarzeń wypadkowych jako innowacyjna forma upowszechniania bezpiecznych metod pracy w górnictwie

S t r e s z c z e n i e

Aktualnie stosowane multimedialne materiały szkoleniowe realizowane na potrzeby kopalń przygotowywane są w oparciu o konkretne zdarzenia, jakie miały miejsce w rzeczywistości. Zdaniem autorów opracowywane materiały nie są w dostatecznym stopniu wykorzystywane. W artykule przedstawiono nową koncepcję interaktywnego tworzenia materiałów szkoleniowych, które można wykorzystywać w szerszym zakresie.

S u m m a r y

Multimedia training materials realized for mines that are currently in use have been prepared basing on specific events that happed in reality. According to the authors those materials are not fully used. In the paper a new concept of interactive creation of training materials that would be used in wider range, is presented.

1. Wstęp

Multimedialne materiały szkoleniowe opracowywane w Laboratorium Metod Modelowania i Ergonomii ITG KOMAG składają się na rozległe repozytorium materiałów multimedialnych, które dystrybuowane są pomiędzy zakładami górniczymi. Wykorzystanie tych materiałów, ze względu na formę (tj. rekonstrukcje wypadków w postaci filmów), sprowadza się do projekcji na cechowniach oraz w różnego rodzaju szkoleniach. Filmy, których tematyka jest często podobna, odtwarzane są przez prowadzącego szkolenia, tworząc niejednokrotnie kilkunastominutowe bloki filmów. Aby podnieść zaangażowanie szkolonego w czasie oglądania rekonstrukcji, stworzono aplikację, której jednym z zadań jest wyszukanie powiązanych ze sobą tematycznie filmów i, w zależności od potrzeb, odtwarzanie wybranych sekwencji (np. samych zdarzeń wypadkowych lub działań profilaktycznych).

Zestawienie opracowanych do tej pory materiałów do postaci, która będzie mogła być przeszukiwana i odtwarzana z wykorzystaniem jednolitego środowiska programowego, pozwoli na usystematyzowanie nabytej wiedzy i skatalogowanie posiadanych zasobów.

2. Przygotowanie bazy danych w oparciu o zunifikowany język modelowania UML

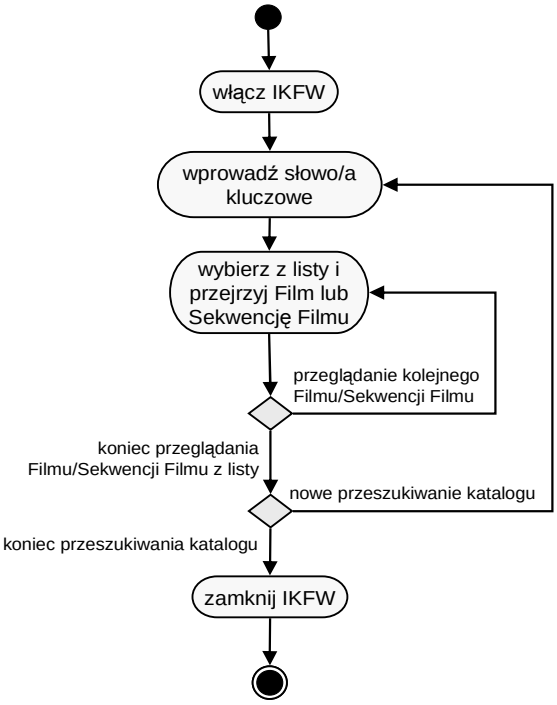
2.1. Przygotowanie zasobów aplikacji

Interaktywny Katalog Filmów „Wypadek” (dalej określany skrótem IKFW) pozwala na przeszukiwanie bazy danych filmów oraz sekwencji tych filmów ze względu na słowa kluczowe.

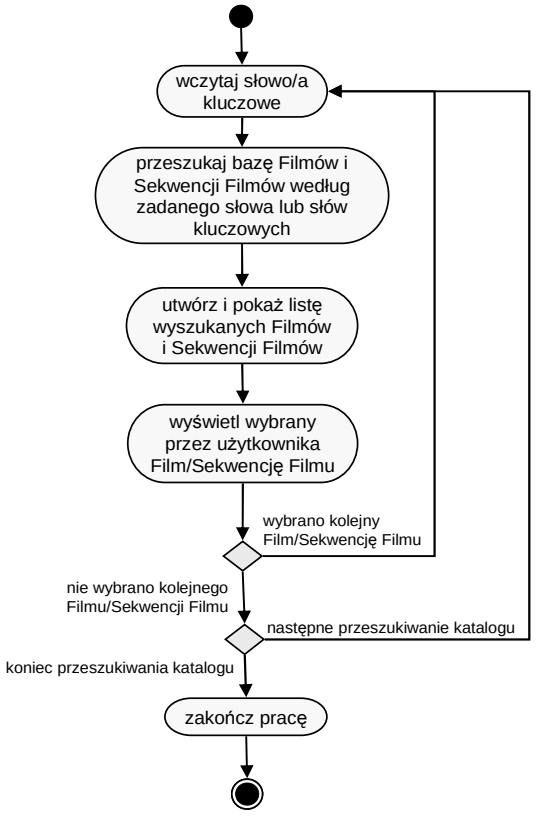
Przygotowanie zasobów aplikacji polega na podzieleniu każdego filmu na sekwencje oraz nadaniu słów kluczowych, zarówno pełnej wersji filmu, jak i poszczególnym jego sekwencjom – rysunek 1.

Rys.1. Przygotowanie zasobów aplikacji IKFW [opracowanie własne]

2.2. Użytkowanie aplikacji



Rys.2. Użytkowanie aplikacji IKFW [opracowanie własne]



Rys.3. Sposób działania aplikacji IKFW [opracowanie własne]

Użytkowanie aplikacji polega na wprowadzeniu słów kluczowych, na podstawie których przeszukiwane są zasoby oraz wyświetlana jest lista filmów i sekwencji filmów spełniających zadany warunek. Każdy element tak wygenerowanej listy może zostać przejrzany przez użytkownika aplikacji. Użytkowanie IKFW przedstawiono na rysunku 2 – z perspektywy użytkownika aplikacji oraz na rysunku 3 – z perspektywy sposobu działania aplikacji.

3. Specyfikacja Interaktywnego Katalogu Filmów „Wypadek”

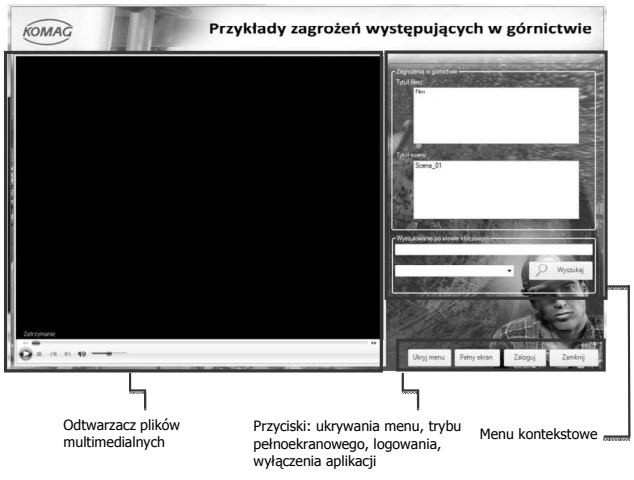
3.1. Opis ogólny

Aplikacja umożliwia użytkownikowi przeglądanie zasobów w postaci filmów, animacji komputerowej na dwa sposoby: przeglądanie całości filmu oraz przeglądanie poszczególnych sekwencji filmu.

Opracowana aplikacja przeznaczona jest dla działów BHP w podziemnych zakładach górniczych do wykorzystania w prezentacjach, mających na celu zwiększenie u tych pracowników świadomości zagrożeń panujących w miejscu pracy. Zastosowanie tego typu aplikacji w trakcie szkoleń pozwoli na zwiększenie ich efektywności poprzez zobrazowanie zagrożeń oraz skutków niewłaściwego zachowania w miejscu pracy, jak również ignorowania przepisów bezpieczeństwa.

3.2. Opis funkcjonalności

Korzystanie z aplikacji jest możliwe bez konieczności jej instalacji na komputerze tzn. jest możliwość uruchamiania jej z dowolnego nośnika, z miejsca, w którym znajduje się plik IFKW.exe. Po uruchomieniu programu użytkownik ma możliwość przeglądania zasobów w postaci filmów i sekwencji filmów w oknie programu. Zastosowanie paska nawigacji umożliwia uruchamianie i zatrzymywanie filmu/sekwencji filmu, przewijanie do pierwszej, ostatniej i kolejnej sceny oraz regulację głośności, opcję pełnego ekranu i pokazywanie/ukrywanie menu kontekstowego.



Rys.4. Ekran programu Interaktywny katalog Filmów „Wypadek” – IFKW [opracowanie własne]

Menu kontekstowe zawiera następujące pola:

- odtwarzacz plików multimedialnych, umożliwiający przeglądanie zasobów,
- menu kontekstowe zawierające takie pola, jak:

  - tytuł filmu,
  - tytuł sekwencji filmu,
  - słowa kluczowe,
- przyciski: ukrywania menu kontekstowego, uruchamiania filmu w trybie pełnego ekranu, logowania w celu wprowadzenia zmian w aplikacji, wyłączenia aplikacji.

Ekran programu Interaktywny Katalog Filmów „Wypadek" przedstawiono na rysunku 4.

4. Podsumowanie

Tworzone w Laboratorium Metod Modelowania i Ergonomii ITG KOMAG filmy mają na celu poprawę bezpieczeństwa pracy wśród pracowników górniczych zakładów podziemnych. Filmy (rekonstrukcje wypadków i/lub filmy instruktażowe) przedstawiane są pracownikom na cechowniach oraz na różnego rodzaju szkoleniach, gdzie, zgodnie z konsultacjami z przedstawicielami kopalń na co dzień zajmującymi się tematyką bezpieczeństwa pracy, zainteresowanie spada, gdy film trwa dłużej niż pięć minut. Aby podnieść efektywność szkolenia oraz zwiększyć zainteresowanie filmami, stworzono repozytorium zdarzeń wypadkowych IKFW.

Repozytorium zdarzeń wypadkowych umożliwia skatalogowanie posiadanych filmów oraz przedstawienie ich w bardziej przejrzystej formie. Dzięki zastosowaniu techniki słów kluczowych, prowadzący szkolenie jest w stanie każdorazowo zmieniać emitowane filmy oraz dowolnie łączyć lub dzielić tematycznie, co bezpośrednio wiąże się z uatrakcyjnieniem przekazywanych informacji.

Wykorzystując bazę danych użytkownik ma dostęp do filmów instruktażowych oraz zdarzeń wypadkowych.

Zalety aplikacji to:

- możliwość ciągłej aktualizacji bazy danych,
- możliwość wyboru poszczególnych sekwencji lub całego filmu,
- intuicyjny interfejs,
- prosta aktualizacja bazy danych,
- możliwość uruchomiania z dowolnego nośnika.

Literatura

1. Michalak D., Rozmus M., Lesisz R., Jaszczyk Ł.: Interaktywne formy kształtowania bezpieczeństwa pracy w górnictwie. KOMTECH 2010, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - Niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2010 s. 163-169.
2. Lesisz R., Michalak D.: Zastosowanie interaktywnych aplikacji w szkoleniach pracowników górniczych zakładów podziemnych. Materiały na konferencję: XV Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, t.1, Jurata, 9-13 maja 2011 s. 485-492.
3. Schmuller J.: UML. Ujednolicony Język Modelowani – wyrażanie związków między klasami w projektowaniu obiektowym

Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2011 r.