

Streszczenie pracy doktorskiej

J. Jagoda: Opracowanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych, z zastosowaniem inteligencji roju

Celem naukowym pracy było wykonanie oraz walidacja algorytmu trasowania sieci sensorycznych z zastosowaniem inteligencji roju pracujących w monitoringu sekcji obudowy zmechanizowanej. W rozprawie przyjęto następującą tezę:

Zastosowanie algorytmów trasowania sieci sensorycznych (pracujących w oparciu o inteligencję roju) zaimplementowanych w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego zapewni odpowiednią organizację przesyłu informacji, zwiększając jednocześnie wymaganą niezawodność działania, elastyczną konfigurację oraz wymagany poziom bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Zdefiniowano również użyteczny cel rozprawy jakim jest opracowanie rozwiązania wspomagającego automatyzację procesu prowadzenia ściany wydobywczej oraz systemu predykcji zagrożeń (takich jak tąpnięcia i obwały skał).

W ramach analizy literatury zdefiniowano środowisko pracy projektowanego algorytmu trasowania w postaci monitoringu parametrów eksploatacyjnych obudów zmechanizowanych. Sekcje obudowy zmechanizowanej pełnią funkcje zabezpieczenia sprzętu i załogi podczas procesu eksploatacji ściany wydobywczej. Precyzyjne położenie sekcji w wyrobisku jest kluczowe w przypadku zachowania ciągłości i bezpieczeństwa procesu wydobywania. Monitoring pracy parametrów sekcji takich jak wartość ciśnienia oleju w stojakach hydraulicznych, bieżącej geometrii sekcji (tj. położenia wybranych elementów sekcji względem wyrobiska), odległości od czoła ściany umożliwi rozpoznanie potencjalnych problemów strukturalnych oraz dostosowanie przyjętych metod eksploatacji i zabezpieczeń na podstawie zebranych danych (narzędzie analityczne do predykcji takich zagrożeń jak tąpnięcia, zawały i obwały skał). W systemach monitorujących opisane parametry stojaków hydraulicznych konieczne jest opracowanie bezprzewodowych interfejsów czujników monitorujących, z racji częstych uszkodzeń przewodów obecnie stosowanych rozwiązań. W tak rozbudowanych sieciach wyrobisk górniczych istotne jest skonstruowanie efektywnej organizacji transmisji danych, mającej na celu zapewnienie niezawodności działania, elastycznej konfiguracji oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Niezawodność działania oznacza pewność, że dane

zarejestrowane przez czujniki dotrą do punktu dyspozytorskiego. Należy więc wpłynąć na zmniejszenie awaryjności czujników oraz przyspieszyć proces identyfikacji i wymiany w przypadku wystąpienia ich awarii. Elastyczna konfiguracja powinna być zapewniona ze względu na zwiększenie efektywności procesów serwisowych i warunków pracy sieci w planowanym rozwiązaniu. Implementacja prototypowanej sieci powinna być łatwa w realizacji, skalowalna, bezpieczna oraz wymagająca niskiego nakładu czasu na wdrożenie i uruchomienie. Większość nowo powstających sieci czujników montowanych w urządzeniach i maszynach górniczych posiada bezprzewodowe interfejsy transmisji danych, a same czujniki zasilane są bateryjnie. Czujniki w zakresie konstrukcji i funkcjonowania muszą spełniać wymogi pozwalające na pracę w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego zdefiniowane w europejskiej dyrektywie ATEX (fr. Atmosphères Explosibles). Nierzadko zapewnienie bezpieczeństwa poprzez odpowiednią konstrukcję elektryczną urządzeń wiąże się z większym zużyciem energii, co w efekcie skutkuje krótszym czasem pracy na baterii. W związku z tym istnieje konieczność optymalizacji zużycia energii.

W rozprawie doktorskiej przeprowadzono również analizę testów symulacyjnych obecnie stosowanych algorytmów trasowania sieci sensorycznych. W wyniku przeglądu stwierdzono, że zastosowanie protokołów opartych o inteligencję roju SI wpływa pozytywnie na ustabilizowanie i zwiększenie przepustowości w sieciach sensorycznych w porównaniu z typowymi algorytmami trasowania typu reaktywnego oraz proaktywnego. Stwierdzono również, że konieczne jest implementacja wybranych typów algorytmów w rozwiązaniach sprzętowych, jak również wykonanie walidacji wyników symulacji oraz prototypowanych rozwiązań.

Badania stanu wiedzy pozwoliły również na sprecyzowanie szczegółowych kryteriów wyboru najkorzystniejszej drogi pakietów danych przesyłanych w sieciach sensorycznych. W procesie definiowania kryteriów wzięto pod uwagę założenia wstępne dotyczące rozwiązania opracowywanego w ramach niniejszej pracy doktorskiej, przy czym analizę wykonano w dwóch obszarach:

- algorytmów i sieci - przepustowość, czas dotarcia pakietu do miejsca docelowego, oszczędność energii, pewność dostarczenia danych do miejsca docelowego,
- sprzętu - w trakcie ustalania kryteriów uwzględniono dostępne rozwiązania czujników oraz dodatkowych komponentów systemu, które muszą spełniać wymienione wymagania w zakresie algorytmów i sieci oraz cechować się odpowiednim poziomem pewności i niezawodności pracy w środowiskach o niekorzystnym wpływie na ich działanie (energooszczędność oraz zgodność z wymogami ATEX).

W następnym kroku opracowano metodę wdrożenia algorytmu do modelu oraz prototypu sieci sensorycznej. Opisano również proces implementacji algorytmu wraz ze szczegółami implementacji w stosie programowym poszczególnych modułów sprzętowych węzłów sieci.

W pracy omówiono proces prototypowania środowiska walidacji algorytmu trasowania w sieci składającej się z trzech węzłów oraz środowisko sieci zawierającej do 30 węzłów. Wspecyfikowano moduł radiowy, który pełni funkcję węzła sieci (moduł radiowy nRF52 firmy Nordic Semiconductor). Do wszystkich elementów sprzętowych środowiska walidacji opracowano oprogramowanie umożliwiające implementację oraz przeprowadzenie badań algorytmu, wraz z pomiarem określonych parametrów pracy sieci sensorycznej. Utworzono autorskie oprogramowanie GMESH, które umożliwia wyświetlanie zawartości pakietów diagnostycznych przesyłanych z sieci sensorycznych, wizualizację ścieżki transmisji danych oraz przedstawienie zależności czasowych poszczególnych kryteriów oceny sieci sensorycznej na wykresach.

Przeprowadzone zostały testy walidacyjne algorytmów opartych o inteligencję roju (wybranych na etapie analizie symulacji) do modelu sieci sensorycznej. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- wartości kryteriów zaimplementowanych algorytmów różniły się nieznacznie pomiędzy sobą oraz w porównaniu z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem algorytmu bazowego (reaktywnego) sieci Fruity Mesh, W przypadku czasu dotarcia pojedynczych pakietów danych były to wartości kilku milisekund, natomiast w przypadku czasu dotarcia przesyłanych paczek danych były to wartości kilkudziesięciu milisekund. Różnice w rejestrowanej przepustowości przesyłanych danych mieściły się w kilkunastu dziesiątych wartości kB/s,
- w dalszej implementacji odrzucony został algorytm pszczele ze względu na najdłuższe czasy realizacji procedury wyboru optymalnej ścieżki przesyłu pakietu danych, które w przypadku rozbudowanych sieci wykazują tendencję wzrostu eksponentyjnego,
- proces implementacji algorytmów w modelu sieci pozwolił zauważyć, że w przypadku algorytmu mrówkowego i pszczelego istnieje również ryzyko powstawania zapętleń w sieci (wybór najlepszego partnera węzła typu NODE może spowodować, że informacja nie dotrze do węzła docelowego). W przypadku algorytmu mrówkowego każdy węzeł typu NODE musi na bieżąco obliczać i aktualizować wartości prawdopodobieństwa tras na podstawie śladów feromonów, co zwiększa obciążenie obliczeniowe węzłów (szczególnie w dużych sieciach). Podobnie, w przypadku algorytmu pszczelego, każdy węzeł typu NODE musi przetwarzać informacje od innych węzłów (tj. pszczoł) oraz

obliczać atrakcyjność różnych tras, co również obciąża zasoby obliczeniowe pojedynczego węzła. W obydwu algorytmach węzły muszą przechowywać informacje o wielu trasach, feromonach (ACO) lub źródłach pożywienia (BEE), co wymaga dużych zasobów dostępnej pamięci. Proste mikrokontrolery, w szczególności jednostki zasilane bateryjnie stosowane w węzłach typu NODE, cechują się ograniczonymi zasobami pamięci stanowiącymi istotny problem przy dużej liczbie węzłów i skomplikowanych obliczeniach. Dlatego w dalszych badaniach proponuje się zastosować algorytm bazujący na optymalizacji rojem cząstek z wykorzystaniem elementów algorytmu mrówkowego. Przeprowadzone badania modelu sieci sensorycznej, stanowią bazę do wykonania badań prototypu sieci składającego się, z co najmniej 30 węzłów,

- we wszystkich funkcjach celu zaimplementowanych algorytmów wprowadzone zostały wagi, które wpływają na optymalizację procesu transmisji danych w sieci zgodnie z odpowiednim kryterium. W związku z wprowadzonym założeniem w następnych etapach pracy (podczas realizacji badań prototypu sieci sensorycznej) należy przeanalizować wpływ doboru wag, na wyniki poszczególnych kryteriów,
- w wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano również koncepcję konfiguracji stanowiska badawczego, dzięki któremu było możliwe wykonanie badań sieci złożonej z większej liczby węzłów.

Następnie zaimplementowano opracowany algorytm do prototypu sieci sensorycznej oraz przeprowadzono badania zgodnie z przyjętymi kryteriami. Stwierdzono, że w miarę zwiększania liczby węzłów występuje spadek przepustowości i wzrost czasu dostarczenia pakietów (przy stabilizacji przepustowości w przedziale 1,6-3,1 kB/s w sieci z 10, 20 i 30 węzłami). Badania procesu rekonfiguracji sieci wykazały, że czas adaptacji sieci mieścił się w zakresie 10-20 sekund. Potwierdzono również prawidłowe działanie sieci z ruchomymi węzłami. Pomiar natężenia prądu nie wykazał istotnych różnic po zastosowaniu proponowanego algorytmu, jednak widoczne było utrzymanie wysokiej wartości współczynnika PDR zapobiegające szybkiemu rozładowaniu węzłów sieci (wydłużenie czasu pracy węzłów przy zasilaniu bateryjnym).

W celu wnioskowania przeprowadzono kompleksową analizę zarejestrowanych danych pomiarowych. W tym celu wykonane zostały analizy statystyczne zarejestrowanych wartości w przypadku poszczególnych kryteriów. W wyniku analiz stwierdzono, że algorytm z zastosowaniem inteligencji roju (SI) znacząco poprawia wartości czasu dotarcia pakietów, przepustowość oraz wskaźnik dostarczenia pakietów (PDR) w porównaniu do tradycyjnego

algorytmu. Algorytm z SI pozwala na stabilizację czasu dotarcia pakietów na poziomie około 150 ms (przy 25 i więcej węzłach), zwiększenie przepustowości do 3 kB/s (w sieci 30-węzłowej) oraz utrzymanie PDR powyżej 94%. Wyniki testu U Manna-Whitneya potwierdziły statystycznie istotne różnice na korzyść algorytmu z SI, co świadczy o jego przewadze w zarządzaniu siecią sensoryczną.

W ramach prac przeprowadzono również analizę technologii wykonania obudów węzłów sieci sensorycznej w strefach zagrożonych wybuchem. W wyniku analiz stwierdzono, że wybór procesu technologicznego wykonania obudowy zależy od wielkości serii produkcyjnej oraz spełnienia wymogów dyrektywy ATEX. W omawianym przypadku zakłada się wykonanie pojedynczych prototypów oraz około 100 sztuk rocznie. Przy założonej skali produkcji zastosowanie technologii form wtryskowych jest nieopłacalne. W przypadku technologii druku 3D oraz obróbki CNC, dostępne są na rynku materiały spełniające wymogi antyelektrostatyczności. Wykazano jednak, że materiały nie posiadają certyfikatu zgodności z normami zharmonizowanymi z dyrektywą ATEX, a producenci deklarują spełnienie wymagań rezystancji powierzchniowej (co wymaga potwierdzenia dodatkowymi pomiarami po wykonaniu obudowy). Technologia odlewów z form silikonowych wymaga nałożenia dodatkowej powłoki antyelektrostatycznej. Wykonanie obudów prototypowych jest najbardziej opłacalne w technologii druku 3D, ze względu na elastyczność projektowania. Natomiast wykonanie obudów w małych seriach (do 100 sztuk) jest najbardziej ekonomiczne uzasadnione przy użyciu form silikonowych.

Przeprowadzone zostały również obliczenia i analizy obwodów elektrycznych węzłów sieci w celu sprawdzenia ich zgodności z wymaganiami dyrektywy ATEX. Przeprowadzone analizy potwierdziły, że zaprojektowane węzły typu NODE i SINK spełniają wymagania norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX (w tym norm PN-EN 60079-0 i PN-EN 60079-11). Wykonano również szczegółowe analizy parametrów znamionowych i deratingu elementów elektronicznych, potwierdzając ich zgodność z wymogami dotyczącymi iskrobezpieczeństwa.

We wnioskach wskazano konieczność prowadzenia dalszych prac w celu rozwoju algorytmu trasowania i weryfikacji jego działania w warunkach in-situ. W związku rozwojem Przemysłu 5.0, a także idei IIoT w przemyśle wydobywczym wzrasta liczba elementów diagnostycznych pracujących w sieciach sensorycznych. Przeprowadzone badania wykazały możliwość zastosowania algorytmów pracujących w oparciu o inteligencję roju do zarządzania transmisją danych w sieciach sensorycznych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Konieczne jest jednak prowadzenie dalszych badań nad rozbudową algorytmu do działania w sieciach składających się z tysięcy węzłów.