

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Energy efficient wireless ad-hoc network for applications in railroad transportation**

Autor rozprawy: **mgr inż. Łukasz Krzak**

Promotor rozprawy: **Prof. dr hab. Tadeusz Pisarkiewicz**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Opiniowana rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniom opracowania urządzeń służących do lokalizacji pojazdów szynowych ze szczególnym uwzględnieniem minimalizacji zużycia energii. W szczególności rozprawa dotyczy projektowania, analizy i wykonania bezprzewodowej sieci osobistej o bardzo niskim zużyciu energii w celu redukcji liczby niezbędnych sesji połączeń do sieci komórkowych wykonywanych za pomocą usługi GSM/GPRS, standardowo zużywającej stosunkowo duże ilości energii, a które to połączenia są stosowane do zapewnienia komunikacji z zewnętrzną infrastrukturą informatyczną (chmurą internetową). Jednym z głównych celów rozprawy jest opracowanie takiego rozwiązania, w którym dane lokalizacyjne, jak również dane pochodzące z czujników są agregowane i przesyłane do jednego (lub kilku w przypadku większej sieci) wyróżnionego urządzenia nazywanego głową klastra, który umożliwia komunikację z zewnętrzną infrastrukturą informatyczną. Tematyka pracy jest aktualna i szczególnie istotna dla sektora ICT w kontekście wzrastającej popularności rozwiązań IoT (*Internet of Things*), które są coraz częściej stosowane w życiu codziennym, realizując koncepcje inteligentnych przestrzeni, tj. inteligentnych budynków, produktów, miast, transportu, systemów energetycznych czy też systemów zdrowia. Opracowane przez autora rozprawy rozwiązanie ma stanowić udoskonalenie systemu wykonanego przez firmę Radionika sp. z o.o., polskiego dostawcę systemów radiokomunikacyjnych dla kolei. Zbudowany przez firmę Radionika system cechuje duża energochłonność, co bardzo ogranicza, a niekiedy nawet uniemożliwia praktyczne wykorzystanie systemu w zakładanych okresach międzyserwisowych pojazdów szynowych. Oprócz zaproponowanego przez autora algorytmu wyboru głowy klastra, w celu przesyłania danych z

czujników ulokowanych w różnych miejscach monitorowanego taboru kolejowego do lokalizatorów, opracowano również dedykowany system wybudzania lokalizatorów sygnałem radiowym, które w ten sposób mogą przebywać przez bardzo długie okresy czasu w trybie bardzo niskiego poboru energii. Tego typu czujniki mogą przysyłać do systemu informatycznego ważne informacje na temat stanu wagonu (np. zamknięcia drzwi, temperatury zewnętrznej, obciążenia osi wagonu) lub jego ładunku (np. wilgotności, stężenia niebezpiecznych gazów). Warto wspomnieć, że wspomniany system wybudzania został przez autora rozprawy oraz pozostałych współautorów opatentowany w naszym kraju. W pracy przedstawiono również analizę sieci typu ad-hoc, skupiając się głównie na aspekcie jej efektywności energetycznej. W celu określenia ilości energii pobieranej z baterii dokonano modyfikacji symulatora zdarzeniowego OMNeT++ (dodając m.in. warstwę abstrakcji sprzętu) i przeprowadzono serię symulacji dla różnych konfiguracji pracy sieci. Co więcej, zaproponowany w pracy protokół zestawiania sieci i tworzenia klastrów został opisany modelem analitycznym, który pozwala na szybkie wyznaczenie prawdopodobieństw: prawidłowej realizacji fazy rozgłoszenia, asocjacji i wyznaczenia głowy klastra. W pracy przedstawiono również analizę poboru ładunku z baterii dla kilku referencyjnych topologii sieciowych. Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowane rozwiązanie pozwala na zmniejszenie o ponad 90% ilości energii pobieranej z baterii przez system komunikacyjny. Co więcej, dzięki wprowadzeniu nowych metod wybudzania sygnałem radiowym opracowany system umożliwia dodatkowo zbieranie informacji z zewnętrznych czujników umieszczonych w wagonach.

W oparciu o przeprowadzone badania literaturowe, a także wykonane badania efektywności pracy istniejącego rozwiązania firmy Radionika sp. z o.o., sformułowano następujące tezy rozprawy:

- I. Możliwe jest przedłużenie cyklu życia baterii zasilających urządzenia lokalizacyjne, które wysyłają dane za pomocą sieci komórkowych, poprzez wprowadzenie interfejsu radiowego o niskiej mocy i umożliwienie węzłom komunikowania się w sieci lokalnej w celu agregacji danych z klastra węzłów oraz minimalizacji niezbędnej liczby sesji komórkowych.
- II. Za pomocą symulatorów sieci można oszacować oczekiwany czas życia baterii dla urządzeń opisanych w tezie nr I pracy, modelując ich zużycie energii i używając warstwy abstrakcji sprzętu do emulacji dokładnego zachowania się węzłów w środowisku wirtualnym, umożliwiając w ten sposób realizację symulacji wielkoskalowych.
- III. Istnieje możliwość zintegrowania systemu wybudzania sygnałem radiowym lokalizatorów, przy wykorzystaniu tego samego interfejsu radiowego, opisanego w tezie nr I pracy, aby umożliwić asynchroniczną komunikację z czujnikami monitorującymi tabor i/lub jego ładunek.

Teza została określona prawidłowo. Jedyna uwaga dotyczy sformułowania związanego z określeniem „sieć lokalna”. Po pierwsze warto było dodać, że autorowi chodzi wyłącznie o realizację sieci bezprzewodowej, a po drugie sieć lokalna charakteryzuje się zwykle znacznie większym zasięgiem i większą przepustowością. Najbardziej znanym przykładem bezprzewodowej sieci lokalnej jest sieć standardu IEEE 802.11 z jego wszystkimi rozszerzeniami. Tymczasem, autor rozważa w pracy sieć standardu IEEE 802.15.4g, którą

organizacja IEEE klasyfikuje jako bezprzewodową sieć osobistą o niskiej przepływności stosowaną do realizacji sieci łączących czujniki w celach prowadzenia inteligentnych pomiarów.

Praca ma charakter zarówno teoretyczny jak i doświadczalny. W ramach udowodnienia postawionej tezy opracowano odpowiednie modele analityczne jak również przeprowadzono szereg eksperymentów praktycznych z wykorzystaniem rzeczywistej sieci testowej opartej na wykonanych urządzeniach elektronicznych oraz symulacyjnych z użyciem zmodyfikowanej wersji symulatora sieciowego OMNeT++.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W spisie literatury Autor przytacza 77 pozycji, w tym jedną własną publikację autorską (opublikowaną w czasopiśmie typu Open Access Elsewiera IFAC-PapersOnLine z 2015 roku) jak również 6 prac współautorskich. Zdecydowana większość cytowanych w spisie literatury pozycji jest anglojęzyczna i obejmuje głównie artykuły opublikowane w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej oraz pozostałych uznanych czasopismach międzynarodowych jak również prace opublikowane w materiałach konferencyjnych znanych i cenionych konferencji międzynarodowych. W spisie znalazło się również sporo standardów międzynarodowych, a także kilka pozycji opisujących strony internetowe, raporty techniczne, książki wydane przez uznane wydawnictwa międzynarodowe, jeden patent oraz czasopisma o zasięgu krajowym. Można więc stwierdzić, że różnorodność cytowanej literatury jest duża. W spisie literatury zabrakło jednak standardu IEEE 802.11, do którego Autor odnosi się w rozdziale drugim jak również szeregu prac poświęconych tematyce zastosowania sieci sensorowych w transporcie kolejowym oraz kilku publikacji przeglądowych związanych z problemem wyboru głowy klastra w sieciach sensorowych. Zdaniem recenzenta warto było również uwzględnić takie publikacje jak:

- J. M. Reason and R. Crepaldi, "Ambient intelligence for freight railroads," in IBM Journal of Research and Development, vol. 53, no. 3, pp. 6:1-6:14, May 2009.
- M. Macucci, S. Di Pascoli, P. Marconcini and B. Tellini, "Derailment Detection and Data Collection in Freight Trains, Based on a Wireless Sensor Network," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 9, pp. 1977-1987, Sept. 2016.
- M. C. Edwards, J. Donelson, W. M. Zavis, A. Prabhakaran, D. C. Brabb and A. S. Jackson, "Improving freight rail safety with on-board monitoring and control systems," Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference, 2005., 2005, pp. 117-122.
- J. B. Hughes, G. D. Horler and E. P. C. Morris, "An investigatory study into transmission power control for wireless sensor networks in railway applications," 7th IET Conference on Railway Condition Monitoring 2016 (RCM 2016), Birmingham, 2016, pp. 1-8.
- M. Tolani, Sunny, R. K. Singh, K. Shubham and R. Kumar, "Two-Layer Optimized Railway Monitoring System Using Wi-Fi and ZigBee Interfaced Wireless Sensor Network," in IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 7, pp. 2241-2248, April 1, 2017.

- D. Jiaying and S. Tianyun, "Research on Energy-Efficient Multi-Path Routing Protocol of WSN for Railway Environment Monitoring," 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Changsha, 2017, pp. 1641-1646.
- N. Sazak and M. Ertug, "The effect of node deployment scheme on LWSN lifetime for railway monitoring applications," 2017 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), Milan, 2017, pp. 1-4.
- A. Krishnakumar and V. Anuratha, "Survey on energy efficient load-balanced clustering algorithm based on variable convergence time for wireless sensor networks," 2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, 2016, pp. 1-5.
- O. Boyinbode, H. Le, A. Mbogho, M. Takizawa and R. Poliah, "A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks," 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems, Takayama, 2010, pp. 358-364.
- C. Jiang, D. Yuan and Y. Zhao, "Towards Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks-A Survey," 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, 2009, pp. 1-6.
- B. P. Deosarkar, N. S. Yadav and R. P. Yadav, "Clusterhead selection in clustering algorithms for wireless sensor networks: A survey," 2008 International Conference on Computing, Communication and Networking, St. Thomas, VI, 2008, pp. 1-8.
- P. Kumarawadu, D. J. Dechene, M. Luccini and A. Sauer, "Algorithms for Node Clustering in Wireless Sensor Networks: A Survey," 2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, Colombo, 2008, pp. 295-300.
- S. Dhiviya, A. Sariga and P. Sujatha, "Survey on WSN Using Clustering," 2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM), Tindivanam, 2017, pp. 121-125.

Można jednak stwierdzić, że Autor zawarł w spisie literatury zdecydowaną większość kluczowych pozycji, dla każdego z poruszanych przez siebie zagadnień. Szkoda za to, że autor nie zdecydował się na umieszczenie przeglądu literatury tzw. *state-of-the-art* w osobnym rozdziale lecz odwoływał się do zgromadzonej bibliografii w rozdziale 2 opisując poszczególne komponenty systemu lokalizacji. W rozdziale tym odniesiono się również do problemu zużycia energii w rzeczywistym systemie lokalizacji opracowanym przez firmę Radionika oraz zaproponowano własną architekturę systemu. Zdaniem recenzenta ten rozdział powinien zostać rozdzielony na dwa niezależne rozdziały z wydzieleniem osobnego rozdziału związanego z przeglądem literatury. Niemniej jednak Autor prawidłowo wyciągnął wnioski z przeglądu literatury i przedstawił je w sposób przekonujący.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Narzędziem badawczym, którym Autor posługiwał się, dowodząc zarówno prawdziwości zredagowanych w rozprawie tez, jak i dokonując szczegółowej analizy komparatywnej było

rzeczywiste środowisko testowe z użyciem wykonanych przez Autora węzłów sieciowych (agregatorów i czujników), symulacja komputerowa, przeprowadzona za pomocą zmodyfikowanego przez Autora na potrzeby pracy symulatora sieciowego OMNeT++, w którym dodano m.in. warstwę abstrakcji sprzętu jak również opracowany model analityczny pozwalający na szybkie wyznaczenie prawdopodobieństw: prawidłowej realizacji fazy rozgłoszenia, asocjacji i wyznaczenia głowy klastra. Autor pracy przeprowadził ciekawe, choć niezbyt obszerne badania symulacyjne dla kilku konfiguracji pracy sieci. Proponowane przez Autora metody projektowania, optymalizacji oraz weryfikacji wydajności pracy zaproponowanych algorytmów i mechanizmów należy uznać za spójne i poprawne z metodologicznego punktu widzenia.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?
 - a. Podstawowym celem pracy było opracowanie, wykonanie i zbadanie efektywności działania systemu do lokalizowania pojazdów szynowych, który przy użyciu bezprzewodowej sieci osobistej o bardzo niskim poborze energii zbierałby informacje z sieci czujników, dokonywał ich agregacji oraz z użyciem wyróżnionych węzłów przesyłał je za pomocą usługi GSM/GPRS do zewnętrznej infrastruktury informatycznej. System ma stanowić ulepszenie istniejącego rozwiązania, charakteryzującego się dużym zużyciem energii. Autor pracy zaprojektował nową architekturę systemu, która wykorzystując wysokiej jakości moduły radiowe pracujące zgodnie ze standardem IEEE 802.15.4g realizuje koncepcję pracy wspomnianą już sieci osobistej. W ramach pracy Autor opracował dedykowany schemat synchronizacji czasu, oparty na sygnale GPS, umożliwiający synchronizację węzłów sieciowych ze wspólnym zegarem. W zakresie warstwy MAC opracował dedykowany protokół dostępu do kanału radiowego, który przy zastosowaniu techniki TDMA (*Time Division Multiple Access*) realizuje proces klastrowania węzłów i agregacji danych w celu minimalizacji niezbędnych transmisji w węzłach, zapewniając jednocześnie niskie zużycie energii. Razem ze współautorami opracował również dedykowany system wybudzania lokalizatorów sygnałem radiowym, które w ten sposób mogą przebywać przez bardzo długie okresy czasu w trybie uśpienia. Warto nadmienić, że moduły radiowe IEEE 802.15.4g oraz system wybudzania lokalizatorów sygnałem radiowym zostały zintegrowane z urządzeniem lokalizacyjnym, działającym przy zastosowaniu pojedynczej anteny współdzielonej dodatkowo z modułem GSM. Zgodnie z obowiązującym stanem wiedzy takie rozwiązanie nie było dotychczas stosowane, co potwierdza uzyskanie w 2017 roku ochrony patentowej w Polsce.
 - b. Autor pracy dokonał ewaluacji modułów IEEE 802.15.4 z użyciem sprzętowej platformy testowej. W tym celu zestawiono zautomatyzowane środowisko testowe w laboratorium, które umożliwiło ustawienie niezbędnych do prawidłowej pracy poziomów mocy nadawczej. Urządzenia poddano również analizie pod kątem uzyskiwanych czułości pracy odbiorników. Szczególną uwagę zwrócono również na odpowiednią selektywność modułów. Wykonano również szereg pomiarów dla trybu pracy LOS (*Line of Sight*) oraz różnych warunków propagacyjnych. Sporo miejsca poświęcono również testom weryfikacyjnym systemu wybudzania modułów sygnałem radiowym. Wszystkie przeprowadzone testy potwierdziły użyteczność stosowania opracowanych i wykonanych modułów ISM.

- c. Autor dokonał również analizy symulacyjnej sieci pracujących w kilku konfiguracjach w oparciu o zmodyfikowany symulator sieciowy OMNeT++. W tym celu opracowano warstwę abstrakcji sprzętu ogólnego, stworzono narzędzie do symulacji behawioralnej, umożliwiające bezpośrednie emulowanie zachowania węzłów poprzez uruchomienie dokładnie tego samego oprogramowania w środowisku docelowym oraz środowisku symulacyjnym. Dodatkowo, opracowano precyzyjny model zużycia energii w węzle, zintegrowano go ze środowiskiem symulacyjnym i zweryfikowano pod kątem stosowania takiego samego sprzętu w sieci referencyjnej. Protokół został uruchomiony w różnych trybach pracy, zarówno na docelowym sprzęcie w topologii referencyjnej, jak i analogicznie w środowisku symulacyjnym. Uzyskane wyniki potwierdziły zgodność zachowania się modułów w obu środowiskach.
- d. Autor opracował także model analityczny, opisujący prawdopodobieństwo wystąpienia kluczowych zdarzeń w zaprojektowanym protokole komunikacyjnym. Model pozwala na szybkie wyznaczenie prawdopodobieństw: prawidłowej realizacji fazy rozgłoszenia, asocjacji i wyznaczenia głowy klastra. W oparciu o opracowany model analityczny i symulacje referencyjnych topologii sieci docelowych, przeprowadzono badanie parametryczne w celu znalezienia wartości kluczowych parametrów protokołu komunikacyjnego, optymalizujących zużycie energii końcowej węzłów.
- e. Ostateczne rozwiązanie Autor przetestował w środowisku symulacyjnym przy zastosowaniu wielkoskalowych topologii odniesienia, a końcowe oszacowanie zużycia energii w topologiach sieci referencyjnych zostało przedstawione i porównane z początkowym rozwiązaniem. Uzyskane wyniki pokazują, że dzięki opracowanemu systemowi możliwa jest 10-krotna redukcja zużycia energii w stosunku do podstawowego rozwiązania firmy Radionika.

Całokształt rozprawy świadczy o głębokiej wiedzy Autora w zakresie poruszanej tematyki. Na szczególną uwagę zasługuje fakt uzyskania patentu na system wybudzania lokalizatorów sygnałem radiowym, co pozwala w rozpatrywanym systemie znacząco zmniejszyć całkowite zużycie energii.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Praca została napisana poprawnym językiem angielskim, z rysunkami, zdjęciami i wykresami wysokiej jakości, a także średniej objętości bibliografią. Zarówno cele rozprawy, uzyskane wyniki badań jak i tezy przedstawione są w sposób przejrzysty. Zaproponowane przez Autora rozprawy metody projektowania i walidacji funkcjonalności pracy nowych algorytmów i mechanizmów są spójne wewnętrznie.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Recenzowana rozprawa, nie jest wolna od drobnych niedociągnięć bądź nieścisłości. W pracy nie zauważono jednak poważniejszych błędów merytorycznych oraz metodologicznych. Szczegółowa analiza pracy umożliwia jednak sformułowanie kilku uwag krytycznych. Należy

jednak nadmienić, że są to głównie błędy o charakterze organizacyjno-redakcyjnym oraz drobne uwagi merytoryczne:

Uwagi dyskusyjne:

- a. Jaka jest wiarygodność uzyskanych wyników symulacji? Czy wyznaczone zostały przedziały ufności? Dlaczego na wykresach nie zostały umieszczone słupki błędów?
- b. Czy w realizowanych symulacjach zastosowano tzw. wygrzewanie symulatora w celu uzyskania stanu ustalonego pracy sieci?
- c. str. 56 Dlaczego w sekcji 4.6 nie przedstawiono wyników uzyskanych niezależnie dla każdej z trzech rozpatrywanych lokalizacji?
- d. Szkoda, że autor pracy przebadął symulacyjnie i porównał z modelem analitycznym tak mało scenariuszy, np. w sekcji 6.5.2 przebadany został tylko jeden scenariusz dla wybranej topologii sieciowej. Dlaczego w całej pracy analizie poddano w ten sposób zaledwie 5 wybranych przypadków?
- e. Jakie zmiany wprowadził autor do algorytmów wyboru głowy klastra i sposobu oszczędzania energii w odniesieniu do opisywanych w rozdziale 2 algorytmów LEACH i HEED?
- f. Czy autor rozważał wybór głowy klastra w oparciu o bardziej rozbudowaną metrykę biorącą pod uwagę nie tylko stan baterii, ale również umiejscowienie węzła w sieci ad-hoc gwarantujące minimalną liczbę transmisji w sieci (zwłaszcza przekazywanie informacji od innych węzłów do głowy klastra) w celu przesłania wszystkich niezbędnych danych?
- g. Czy może wystąpić przypadek, w którym dwa lub więcej węzłów mają dokładnie taką samą wartość metryki "The vitality metric"? Z jaką dokładnością podawana jest ta metryka?
- h. Czy jest jakieś ograniczenie co do liczby głów klastra w rozważanej sieci? Co się dzieje w przypadku kiedy węzeł znajduje się pośrodku dwóch głów klastrów i równocześnie uczestniczy w procesie wyboru dwóch głów?
- i. Czy w procesie potwierdzenia wyboru głowy klastra pośredniczące węzły również wielokrotnie ponawiają transmisję do innych węzłów, aby zwiększyć prawdopodobieństwo poprawnej transmisji? Ile razy głowa klastra ponawia potwierdzenie informacji o tym, że została wybrana głową klastra?
- j. Dlaczego w Tabeli 6 przyjęta wartość parametru N_{FS} wynosi 3, a w opisie Autor zaleca ustawienie tego parametru na liczbę parzystą?

Mniej istotne uwagi dyskusyjne:

- a. Czy na str. 38 zamiast pasma g1.4 nie powinno być pasmo h1.7 (zgodnie z Tabelą 1), które określa pracę urządzeń w zakresie częstotliwości 869.7-870 MHz?
- b. Autor w pracy pisze, że korzysta z sieci lokalnych jednak proponowane rozwiązania tak naprawdę wykorzystują standard dla sieci WPAN - IEEE 802.15.4g. Wprawdzie zasięg w paśmie częstotliwości 868MHz jest stosunkowo duży, ale uzyskiwane przepustowości pasują bardziej do sieci WPAN niż WLAN.
- c. str. 16 Autor pisze, że opracowany został protokół dla sieci wireless ad-hoc mesh network. Jak autor rozumie pojęcie sieci kratowej w odniesieniu do rozpatrywanych w pracy topologii?

- d. str. 19 IEEE 802.15.4 based protocol: IEEE 802.15.4 jest standardem, w którym zdefiniowano szereg protokołów. Z opisu nie wynika, który konkretnie protokół zastosował Autor.
- e. str. 19 Utrata przepustowości wynika również z dużej liczby kolizji, które są charakterystyczne dla scenariuszy ze stacjami ukrytymi.
- f. Szkoda że w rozdziale 2.3 autor nie porównał wszystkich wymienionych protokołów klastrowania pod kątem różnych kryteriów, ważnych z punktu widzenia tematu rozprawy (najlepiej w formie odpowiedniej tabeli, co znacząco ułatwiłoby takie porównanie i docelowo prawidłowy wybór odpowiednich funkcji).
- g. str. 51 Czym różnią się opracowane moduły ISM, dla których pomiary PER w funkcji poziomu sygnału wejściowego przedstawiono na rysunku 19 (również 20)? Jaki układ scalony zgodny z IEEE 802.15.4 zastosowano w opracowanych modułach?
- h. Dlaczego na rysunkach 21 i 22 nie zaznaczono słupków błędów skoro pomiary powtarzano dla każdego punktu 10 razy? Czy nadawanie zaledwie 1000 pakietów pozwoliło uzyskać wiarygodne wyniki pomiarów? Ta sama uwaga ma miejsce w odniesieniu do wyników zaprezentowanych w sekcji 4.6 i rysunku 24.
- i. str. Jaka jest wiarygodność wyników pomiarów uzyskana na rysunku 23? Ile razy powtarzano pomiary i dlaczego na wykresie zabrakło słupków błędów?
- j. Dlaczego na rysunku 12 id.confirmation jest wysyłany w losowym slocie i dlaczego na rysunku są narysowane tylko 3 szczeliny?
- k. Co się stanie w przypadku, gdy metryka "The vitality metric" we wszystkich pracujących węzłach będzie wynosiła -1?

Uwagi redakcyjne:

- a. w pracy dwukrotnie występuje sekcja numer 1.2
- b. str. 7 przez firmę Radionika -> przez firmę Radionika
- c. str. 7 i wysyłania do infrastruktury -> i wysyłana do infrastruktury
- d. str. 26, 33, 34, 36, 37, 61, 69, 70, 129uA -> μA
- e. str. 32 two of wchich -> two of which
- f. str. 37 w pracy stosowane są dwa różne systemy notacji separatora dziesiętnego: kropka oraz przecinek (0.4ms, 0,5uA; 865,7MHz, 869.9 MHz).
- g. str. 55 21uW -> $21\mu W$
- h. str. 61 state-less -> stateless

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny. W pracy zaprojektowano, przeanalizowano i wykonano system do lokalizacji pojazdów szynowych oparty na bezprzewodowej sieci osobistej o bardzo małym zużyciu energii, co umożliwiło redukcję liczby niezbędnych połączeń do sieci komórkowych wykonywanych za pomocą energochłonnej usługi GSM/GPRS. Jak wykazał Autor możliwe jest zastosowanie rozwiązania, w którym dokonujemy agregacji danych z czujników w wyróżnionym węźle (lub węzłach) sieci nazywanym głową klastra w celu przesłania ich do zewnętrznej infrastruktury informatycznej. Tematyka pracy jest niezwykle aktualna, na co wskazują najnowsze publikacje pojawiające się w uznanych czasopiśmie międzynarodowych (np. X. Ma, H. Dong, X. Liu, L. Jia, G. Xie and Z. Bian, "An Optimal Communications Protocol for Maximizing Lifetime of Railway Infrastructure Wireless

Monitoring Network," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. PP, no. 99, 21 Dec. 2107) i ważna dla rozwoju inteligentnego transportu. Jak wykazał Autor rozprawy, dzięki zaproponowanym algorytmom i technikom udało się obniżyć zużycie energii o ponad 90% w stosunku do istniejących na komercyjnym rynku rozwiązań (system firmy Radionika). Przedstawione rozważania teoretyczne w zakresie modelowania analitycznego jak również przygotowana sprzętowa platforma testowa oraz opracowane modele symulacyjne świadczą o wysokiej użyteczności wykonanej pracy. Trudno nie zgodzić się ze stwierdzeniem, że niniejsza rozprawa wnosi znaczący wkład do aktualnego stanu nauki w zakresie projektowania protokołów komunikacyjnych dla bezprzewodowych sieci sensorowych, jak i do stanu techniki poprzez opracowanie dedykowanego systemu wybudzania lokalizatorów sygnałem radiowym, co pozwala im na przebywanie przez długie okresy czasu w trybie minimalnego poboru energii.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a. niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b. wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c. **spełniająca wymagania,**
- d. spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Marek Natkiewicz

