

doi:10.15199/48.2018.11.27

Protokoły routingu dla systemów Internetu Rzeczy – badania symulacyjne wybranych protokołów

Streszczenie. W niniejszej publikacji zebrano podstawowe informacje związane z wybranymi protokołami routingu w systemach Internetu Rzeczy. Przedstawiono genezę tychże protokołów wywodzącą się z sieci Ad Hoc a następnie wymagania stawiane protokołom routingu stosowanym w sieciach IoT, gdzie narzuty protokołów powinny być jak najmniejsze a same protokoły szybkozbieżne. W artykule przedstawiono podział protokołów routingowych oraz szerzej scharakteryzowano wybrane trzy (DSR, OLSR i AODV), które później poddano badaniom symulacyjnym.

Abstract. This publication gathers basic information about selected routing protocols used in Internet of Things systems. The genesis of these protocols originating from the Ad Hoc network is presented and then the requirements for routing protocols, where protocol overheads should be as small as possible and the high-speed protocols themselves. The article presents the division of routing protocols and more broadly characterized three (DSR, OLSR and AODV), which were later subjected to simulation research. (**Routing protocols for IoT systems – simulation investigations**).

Słowa kluczowe: Internet Rzeczy, transmisja danych, protokoły routingu, routing

Keywords: Internet of Things, data transmission, routing protocols, routing.

Wstęp

Technologia Internetu Rzeczy zyskała w ostatnich latach ogromną popularność. Urządzenia, rzeczy, sensory uzyskały wirtualną tożsamość, która pozwala im na połączenie się i komunikację ze sobą, społeczeństwem oraz z konkretnym użytkownikiem systemu. Celem obecnych badań technologii IoT jest uzyskanie łączności między obiektami bez względu na czas, miejsce, świadczoną usługę oraz używane protokoły komunikacyjne [1, 2]. Przy obecnej rosnącej potrzebie łączności bezprzewodowej w systemach IoT do komunikacji pomiędzy obiektami wykorzystuje się rozwiązania z sieci Ad Hoc.

Protokoły routingu w sieciach Ad Hoc powinny być proste, szybkozbieżne i w sposób minimalny wykorzystujące dostępne zasoby, zarówno sprzętowe, jak i te dotyczące dostępnej szerokości pasma. W przeciwieństwie do sieci przewodowych protokołów trasowania w sieciach Ad Hoc musi między innymi sprostać takim ograniczeniom jak wąskie pasmo, łącza jednokierunkowe, duża dynamika topologii czy ograniczone zasoby sprzętowe i energetyczne. Kolejnym wyzwaniem dla protokołów trasowania jest mobilność węzłów [3, 4]. Bezprzewodowe mobilne sieci Ad Hoc (MANET – ang. Mobile Ad-hoc Networks) należą do grupy najnowszych technologii stosowanych w telekomunikacji. Są one tworzone przez zestaw samoorganizujących się mobilnych urządzeń komunikacji bezprzewodowej zdolnych do budowy sieci komunikacyjnej bez udziału stałej infrastruktury i urządzeń centralnych [5, 6].

Protokoły routingu w sieciach Ad Hoc można podzielić na proaktywne, reaktywne oraz hybrydowe. W protokołach proaktywnych w każdym węźle utrzymywane są zawsze możliwie najnowsze informacje na temat tras do pozostałych węzłów. Trasy przechowywane są w regularnie aktualizowanych tablicach routingu. Protokoły reaktywne to takie, w których trasa jest wyznaczana na bieżąco po przesłaniu odpowiedniego żądania przez węzeł nadawczy. W protokołach hybrydowych sieć dzielona jest na mniejsze obszary, a węzły przechowują tablice tras dla tychże obszarów [3 - 6]. Protokoły routingu stosowane w sieciach IoT można także podzielić ze względu na liczbę odbiorców komunikatu: na unicastowe i multicastowe. Podział protokołów routingu wraz z przykładami przedstawia tabela 1 [3, 4]. Istnieje jeszcze wiele podziałów i różnych protokołów routingu, zwłaszcza ciekawe są nowe

rozwiązania bazujące na mechanizmach ruchu mrówek w celu oszczędzania energii jak np. protokół EARA [7].

Tabela 1. Podział protokołów routingu ze względu na zarządzanie tablicą routingu

Protokoły proaktywne	Protokoły reaktywne	Protokoły hybrydowe
OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)	AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol)	EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)
DSDV (Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing Protocol)	DSR (Dynamic Source Routing Protocol)	ZRP (Zone Routing Protocol)
TBRPF (Topology Dissemination based on Reverse-Path Forwarding Routing Protocol)	DSRFLOW (Flow State in the Dynamic Source Routing Protocol)	
MMRP (Mobile Mesh Routing Protocol)	LUNAR (Lightweight Underlay Network Ad hoc Routing)	
RPL (Routing Protocol for LLNs)		

Architektura trasowania w sieciach Ad Hoc może być płaska lub hierarchiczna. W płaskiej architekturze każdy z węzłów należących do takiej sieci jest niezależnym routerem identyfikowanym przez swój adres. Nie jest wymagane zarządzanie ruchem, ponieważ każdy węzeł jest widoczny poprzez protokół trasowania [6, 8]. Protokoły te w swoich tablicach trasowania posiadają wpisy tras do wszystkich węzłów danej sieci dlatego też są one odpowiednie tylko dla niewielkich sieci. Ideą trasowania hierarchicznego jest łączenie węzłów w grupy zwane klastrami. W klastrze takim jeden z węzłów zostaje wyznaczony na węzeł główny, w którym przechowywane są informacje dotyczące przynależności węzłów do klastra. Kiedy węzeł chce przesłać pakiet wysyła go do węzła głównego, będącego brzegowym węzłem klastra [3, 8, 9].

Wymagania stawiane protokołom routingu

Protokoły routingu stosowane w systemach IoT [10, 11, 12] muszą spełnić szereg wymagań oraz muszą być dostosowane do wielu ograniczeń związanych z:

- ograniczoną mocą węzła, która w pierwszej kolejności wydatkowana jest na bieżące działanie węzła, pobieranie, konwertowanie i zapisywanie danych oraz ich późniejszą transmisję.
- skalowalnością, czyli możliwością dynamicznego dostosowania się sieci do zwiększającej się liczby podłączonych urządzeń.
- mobilnością urządzeń, która staje się coraz większa (coraz więcej obiektów w coraz większym zakresie ruchu). Trudno wtedy ustalić topologię sieci dla celów routingu, ponadto często trudno odnaleźć dany węzeł chociażby ze względu na czas uśpienia.
- czasem transmisji pakietów t_{PDT} , który powinien być jak najmniejszy. Czas ten definiowany jest jako średni czas opóźnienia w obie strony (ang. end-to-end delay) i obejmuje wszystkie możliwe przyczyny począwszy od opóźnienia samej transmisji, czasu buforowania danych, czasu retransmisji, czasu wyznaczenia trasy pakietu. Czas ten można wyznaczyć jest z zależności:

$$(1) \quad t_{PDT} = \frac{\sum T_1 - T_2}{N},$$

gdzie: T_1 – czas, po którym pierwszy pakiet danych dociera do adresata, T_2 – czas, po którym transmitowany jest pierwszy pakiet przez nadawcę, N – liczba pakietów przeznaczonych do wysłania.

- minimalną przepustowością sieci K , która określana jest jako stosunek liczby pakietów (lub bitów) otrzymanych przez adresata do wszystkich wysłanych przez źródło.
- wymaganym niskim poziomem błędów w transmisji wyznaczanym jako stosunek liczby pakietów poprawnie odebranych do całkowitej liczby wysłanych danych przez nadawcę (PDR – Packet Delivery Ratio). Powodem utraty danych w systemach IoT mogą być pętle routingu, które powstają na skutek nieumiejętnego rozplanowania adresacji IP.
- narzutem (ang. routing overhead) zdefiniowanym jako stosunek liczby pakietów protokołu routingu do liczby wszystkich odebranych pakietów.

Wybrane protokoły routingu

Do badań wybrano trzy protokoły routingu bardzo często wykorzystywane w systemach IoT. Jest to protokół AODV (ang. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol), protokół DSR (ang. Dynamic Source Routing Protocol) oraz OLSR (ang. Optimized Link State Routing Protocol) [12].

Protokół AODV jest on jednym z bardziej znanych protokołów reaktywnych, nad którymi trwają prace badawcze [13]. Protokół pozwala na szybkie odkrywanie tras i nie wymusza na węzłach przechowywania danych o niedostępnych węzłach. Zaletą protokołu jest szybka reakcja na zmiany w topologii sieci. W przypadku zerwania połączenia, kolejne elementy sieci są o tym informowane. Dodatkowo protokół oznacza trasy numerem sekwencyjnym, co pozwala unikać tzw. pętli routingu. W chwili gdy węzeł chce wysłać dane a nie ma stosowanego wpisu w tablicy routingu, rozsyła wiadomość (RREQ) do wszystkich swoich sąsiadów. Informacja ta jest rozsyłana w sposób rozgłoszeniowy w całej sieci. Węzeł będący adresatem odsyła wiadomość (RREP) do węzła nadawcy. Węzły pośrednie, przez które przechodzi RREP wpisują do swoich tablic routingu trasę do szukanego celu. Taki mechanizm zapewnia powstanie dwukierunkowej ścieżki do komunikacji pomiędzy węzłami. Ponadto protokół AODV (podobnie jak inne) stosuje wiadomości HELLO. Wiadomości te są okresowo rozsyłane informując węzły w zasięgu nadajnika o obecności danej stacji. Działanie

protokołu może być niepoprawne w przypadku pojawienia się połączeń jednokierunkowych [11, 13].

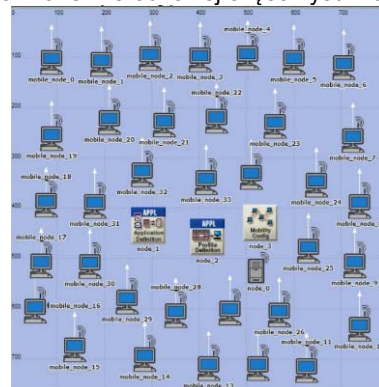
Protokół DSR jest kolejnym protokołem wyszukiwania trasy na żądanie [12, 14]. Mechanizm wyszukiwania wygląda w nim podobnie jak w protokole AODV. Różnice są takie, że nie jest to protokół typu hop-by-hop, jak to było w przypadku poprzedniego, ale typu „source routing”, czyli przechowujący w tablicach routingu pełne dane o trasach do celów. Działanie protokołu można podzielić na dwie fazy: wykrywanie trasy i zarządzanie dostępną trasą. Aby wysłać dane do innego węzła należy utworzyć pakiet, który w swoim nagłówku zawiera listę adresów hostów, przez które pakiet musi przejść, aby osiągnąć żądany węzeł w sieci. Zestawy tras przechowywane są w pamięci podręcznej (tzw. route cache). W przypadku, gdy trasa nie jest zapisana w pamięci rozpoczyna się proces wykrywania trasy podobny jak dla protokołu AODV. Drugą fazą, jaką można wyróżnić jest utrzymanie i zarządzanie pozyskanymi trasami. Węzły monitorują procesy przesyłania pakietów i informują wysyłających dane o napotkanych problemach. Węzeł wykrywający problem wysyła wiadomość o błędzie (RERR) do węzła, który wygenerował dane. Węzeł otrzymujący taką wiadomość musi usunąć z pamięci wszystkie trasy, które przechodzą przez stację zgłaszającą błąd połączenia [14, 15].

Protokół OLSR łączy zalety stabilności protokołów stanu łącza i natychmiastowej dostępności tras protokołów proaktywnych wymieniając okresowo informacje o topologii z innymi elementami sieci [16]. Elementy sieci wybierają zbiór sąsiednich elementów, tak zwanych Multi-Point Relays (MPR), odpowiedzialnych za kontrolę przepływu pakietów w sieci i mających wpływ na zmniejszenie obciążenia sieci poprzez redukcję liczby transmisji danych do rzeczywiście wymaganej. Protokół wysyła dwa typy informacji dodatkowych: HELLO zawierającej dane na temat adresu węzła oraz jego sąsiadów oraz TC (ang. Topology Control) zawierającej listę dwukierunkowych tras pomiędzy węzłem a jego sąsiadami [11, 16].

Więcej informacji, (które ze względu na ograniczoną objętość nie zostały przedstawione) na temat innych protokołów routingu stosowanych w systemach IoT można znaleźć między innymi w [17-20].

Badania wybranych protokołów

Przeprowadzono badania symulacyjne wybranych protokołów routingu, część z nich zaprezentowano na rysunkach 2 - 5. Symulacje obejmowały wyznaczenie parametrów (opisanych w rozdziale 2) dla protokołów ADOV, DSR ora OLSR przy założeniu zmieniającej się liczby przyłączonych węzłów do sieci IoT. Liczbę jednocześnie podłączonych węzłów zmieniano w zakresie 10 – 50. Za nadzorowanie całości symulacji i jej parametrów odpowiedzialne są ikony Aplikacji Config oraz Profile Config uwidocznione w środkowej części rysunku 1.



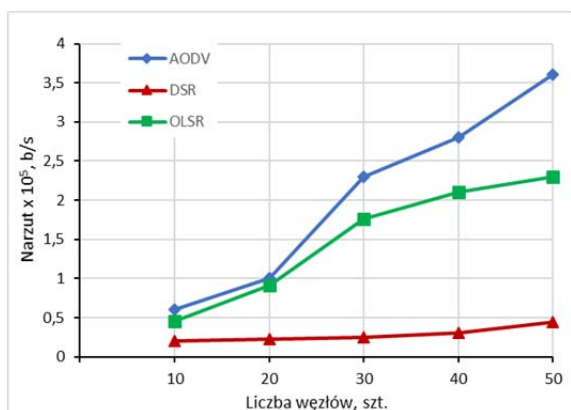
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia urządzeń w symulowanej sieci

Podstawowe parametry symulacji zostały zebrane w tabeli 1. Symulacje zostały przeprowadzone w środowisku OPNET Modeler (obecnie Riverbed).

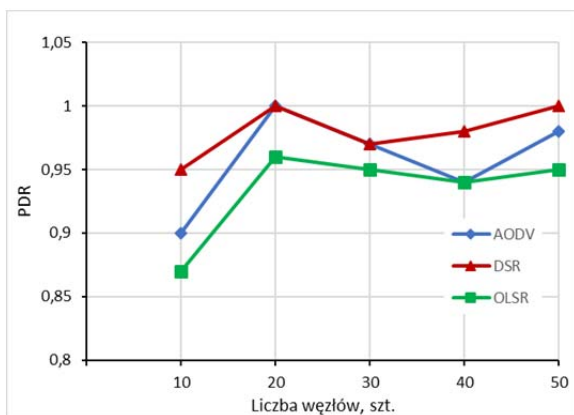
Tabela 1. Podstawowe parametry symulacji

Parametr	Wartość
Liczba węzłów	10-50
Obszar zajmowany przez sieć	0-1000 m
MAC	802.11
Czas symulacji	100 s
Rozmiar pakietu	64B
Szybkość ruchu się węzłów	1-5 km/h

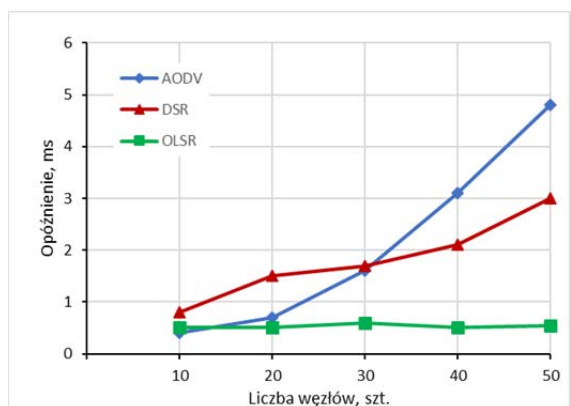
Z rysunku 2 wynika, że narzut protokołów OLSR i AODV jest kilkukrotnie większy niż protokołu DSR, co wskazywałoby, iż właśnie ten protokół powinien być stosowany w systemach IoT. Parametr PDR mówiący o skuteczności dostarczenia danych do adresata przedstawiony na rysunku 3 pozwala stwierdzić, że przy wzrastającej liczbie węzłów w sieci wszystkie protokoły zachowują się w podobny sposób.



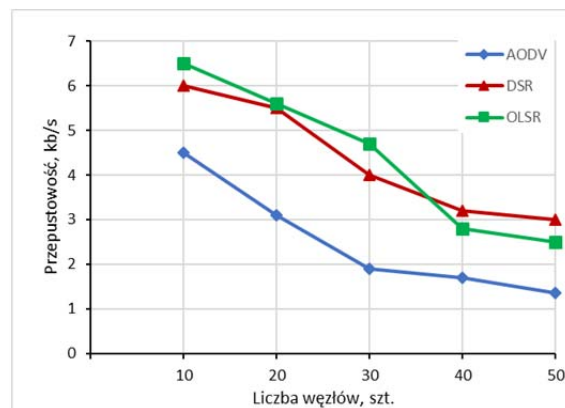
Rys. 2. Narzut protokołów routingu w zależności od liczby węzłów



Rys. 3. PDR w zależności od liczby węzłów



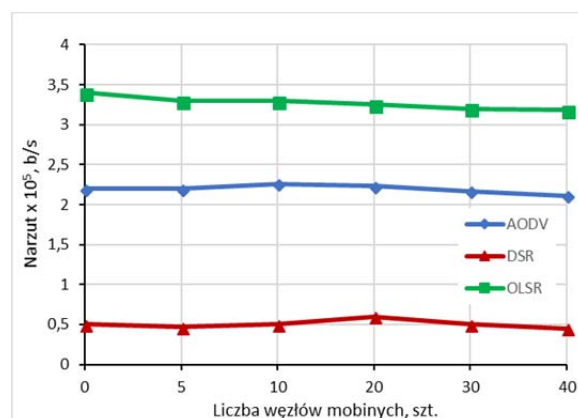
Rys. 4. Opóźnienie w zależności od liczby węzłów



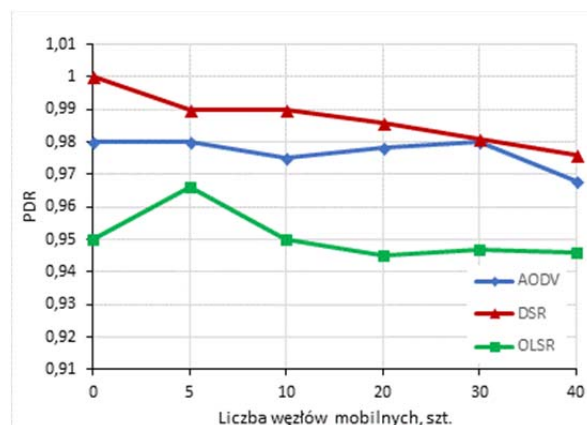
Rys. 5. Przepustowość w zależności od liczby węzłów

Z kolei opóźnienie (rys. 4) w transmisji danych, w sieci wykluczającej węzły mobilne, jest wyraźnie mniejsze dla protokołu OLSR i wynosi mniej niż 1 ms podczas, gdy dla podobnych warunków opóźnienie to wynosi nawet 5 ms dla innych protokołów. Wzrastająca liczba węzłów ma wpływ na zmniejszenie przepustowości transmisji w sieci, przy czym jest ona najmniejsza dla protokołu AODV.

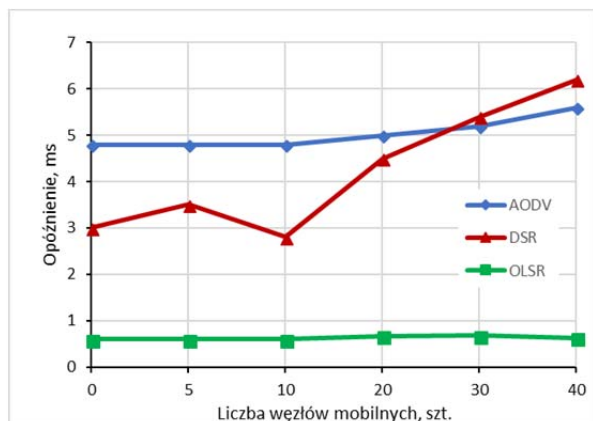
Kolejne eksperymenty symulacyjne miały na celu zbadanie wpływu liczby węzłów mobilnych na opisane wcześniej parametry. W zaprojektowanej wcześniej sieci przy każdym przebiegu symulacji podmieniano część węzłów stacjonarnych na węzły mobilne poruszające się z losowo dobieraną prędkością z zakresu 1 – 5 km/h. Prędkość została ustalona względem poruszającego się pieszko człowieka. W wyniku symulacji otrzymano wyniki narzutu, PDR, opóźnienia oraz przepustowości przedstawione na rysunkach 6 – 9.



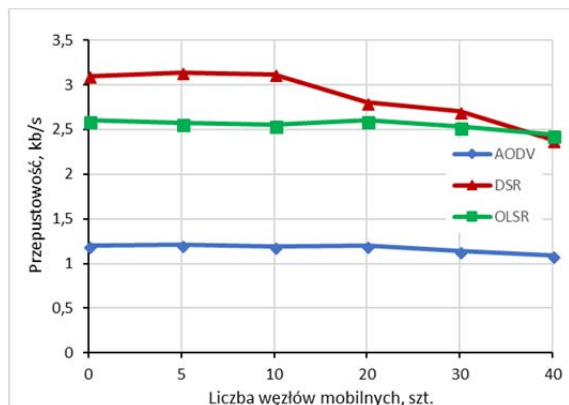
Rys. 6. Narzut protokołów routingu w zależności od liczby węzłów mobilnych w sieci



Rys. 7. PDR w zależności od liczby węzłów mobilnych



Rys. 8. Opóźnienie w zależności od liczby węzłów mobilnych



Rys. 9. Przepustowość w zależności od liczby węzłów mobilnych

Podobnie jak w przypadku przedstawionym na rysunku 2 narzut protokołu DSR (rys. 6) jest najmniejszy. Zwiększająca się liczba węzłów mobilnych nie wpływa na niego znacząco w przypadku żadnego testowanego protokołu. Skuteczność dostarczenia danych (PDR, rys. 7) zmniejsza się dla protokołów DSR i AODV natomiast pozostaje na praktycznie stałym poziomie dla protokołu OLSR. Zaletą stosowania protokołu OLSR jest również bardzo niewielkie opóźnienie transmisji danych, które nie zależy silnie od liczby węzłów mobilnych. Taką właściwością charakteryzuje się protokół DSR, co oznacza, że stosowanie go w sieciach, gdzie liczba węzłów poruszających się może być duża, jest niewskazane. Przepustowość (rys. 9) sieci maleje w przypadku wszystkich badanych protokołów przy ponad 10 węzłach mobilnych w sieci, jednakże dla protokołu DSR spadek przepustowości jest najbardziej zauważalny.

Podsumowanie

Z przedstawionych zależności wynika, że pod względem narzutu, opóźnienia, a także przepustowości najgorzej wypada protokół AODV, zwłaszcza przy wzrastającej liczbie węzłów w sieci, co nie jest wskazaniem do jego wykorzystania w istniejącej postaci w systemach IoT. Najlepiej wypada protokół DSR pomimo dużych opóźnień narzut protokołu jest niewielki, a przepustowość nie zależy silnie od liczby węzłów. Niestety protokół ten nie radzi sobie w przypadku dużej liczby stacji mobilnych. OLSR jest protokołem o najmniejszych opóźnieniach, ale też liczba utraconych danych (wynikająca z PDR) jest większa niż dla innych protokołów.

Autorzy: dr inż. Beata Krupanek, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: beata.krupanek@polsl.pl;
dr inż. Ryszard Bogacz, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl;

LITERATURA

- [1] Abidoye A., Obagbuwa I.: Models for integrating wireless sensor networks into the Internet of Things. *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 7, Iss. 3, (2017).
- [2] Ghasemahmadi M.: Efficient Wireless Transmission Supporting Internet of Things. B.Sc., University of Terhan, (2015).
- [3] Boukerchea A., Turgutb B., Aydinç N., Ahmadd M., Bölönd L., Turgut L.: Routing protocols in ad hoc networks: A survey. *Computer Networks*, vol. 55, Iss. 13, (2011).
- [4] Pandey K., Swaroop A.: A Comprehensive Performance Analysis of Proactive, Reactive and Hybrid MANETs Routing Protocols. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 6, No 3, vol. 11, (2011).
- [5] Alameri I.: MANETS and Internet of Things System: A Development of Data Routing Algorithm. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 2, (2018).
- [6] Johnson D.B., Maltz D.A., Broch J.: DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. Computer Science Department, Carnegie Mellon University, <http://www.monarch.cs.cmu.edu>.
- [7] Liu X. Routing Protocols Based on Ant Colony Optimization in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Special section on Intelligent systems for the internet of things*, vol. 11, (2017).
- [8] Johnson D.B.: Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts. Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 158–163. IEEE Computer Society, December, (1994).
- [9] Gorantala K.: Routing Protocols in Mobile Ad-hoc Networks. Master's Thesis in Computing Science, Umeå University, (2006).
- [10] Talwar M.: Routing techniques and protocols for internet of things: A survey. *Proceeding of NCRIET-2015 & Indian J.Sci.Res.* 12(1), 417-423, (2015).
- [11] Saleem T.J.: A Detailed Study of Routing in Internet of Things. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, Volume 5, Issue 3, vol. 5, (2016).
- [12] Ali S., Ali A.: Performance Analysis of AODV, DSR and OLSR in MANET. Department of Electrical Engineering with emphasis on Telecommunication Blekinge Institute of Technology, Sweden (2009).
- [13] Sharma A., Saini S.: Energy Efficient AODV Protocol for Internet of Things. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)* Volume 5, Issue 8, vol. 8, (2016).
- [14] Talwar M.: Routing techniques and protocols for internet of things: A survey. *Proceeding of NCRIET-2015 & Indian J.Sci.Res.* 12(1), 417-423, (2015).
- [15] Channamma S., Bhuvaneshwari M., Pooja M., Jayalakshmi J.: Routing, Applications and Research Challenges in IoT. *International Journal on Emerging Technologies (Special Issue on ICRIET)*, 252-256, (2016).
- [16] Adjih C., Clausen T., Jacquet P., Laouiti A., Muhlethaler P., Raffe D.: Securing the OLSR protocol. Conference: 2nd IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net 2003).
- [17] Lee S. K., Bae M., Kim H.: Future of IoT Networks: A Survey. *Appl. Sci.* (2017), 7, 1072.
- [18] Prasad M., Bharat H.: Network routing protocols in IOT. *International Journal of Advances in Electronics and Computer Science*, Volume-4, Issue-4, vol. 4, (2017).
- [19] Sankaran S., Sridhar R.: Modeling and Analysis of Routing in IoT Networks. 2015 Intl. Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet'15), Dec. 16-19, (2015), Trivandrum, India.
- [20] Johnson D.A., Maltz D.A.: Protocols for Adaptive Wireless and Mobile Networking. *IEEE Personal Communications*, 3(1):34–42, February, (1996).