

Energooszczędne i bezpieczne protokoły zwiększające żywotność sieci sensorowych

Streszczenie. Praca dotyczy sieci bezprzewodowych czujników. Prezentowany jest ogólny model tego typu sieci. Szczególna uwaga jest zwrócona na metody oszczędzania energii oraz energooszczędne i bezpieczne protokoły komunikacyjne stosowane w bezprzewodowych sieciach sensorowych. Omawiane są dwa podstawowe podejścia do efektywnego zarządzania zasobami energetycznymi urządzeń tworzących sieci, tj. sterowanie aktywnością węzłów oraz sterowanie poziomem mocy nadawanego sygnału. Prezentowane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych potwierdzają, że zastosowanie tych rozwiązań pozwala na efektywne gospodarowanie zasobami energetycznymi sieci co znacząco podnosi jej żywotność i niezawodność.

Abstract. The paper is concerned with wireless sensor networks (WSN). The formal model of a WSN system is presented. Next properties, limitations and basic issues related to development of wireless sensor network applications are investigated. The focus is on energy aware inter-node communication strategies. The approaches to power control and activity control of nodes are briefly summarized. The results of the performance evaluation of energy aware protocols through simulation and testbed implementation are presented and discussed. The presented results confirm the efficiency of discussed techniques in energy saving and extending the lifetime and reliability of WSN. **(Energy-efficient and secure protocols for extending lifetime of sensor networks)**

Słowa kluczowe: Bezprzewodowa sieć sensorów, sieć energooszczędna, sterowanie topologią, sterowanie poziomem mocy sygnału, sterowanie aktywnością modułów radiowych

Keywords: wireless sensor network, WSN, energy aware network, topology control, power control, activity control

Wprowadzenie

Inteligentne sensory połączone siecią bezprzewodową stwarzają nowe możliwości gromadzenia i przekazywania danych. Bezprzewodowa sieć sensorów (ang. *Wireless Sensor Network* — WSN) [1, 2] tworzona jest najczęściej w trybie ad hoc, przez niewielkich rozmiarów urządzenia, stanowiące węzły sieci gęsto rozmieszczone na dużym obszarze. Istotną własnością odróżniającą sieć typu ad hoc od innych systemów stosujących transmisję bezprzewodową jest zdolność do samoorganizacji — urządzenia same organizują się w sieć. Wszystkie węzły sieci są równoprawne i mogą komunikować się wzajemnie rywalizując o dostęp do kanału radiowego. W ogólnym przypadku sieci WSN tworzą urządzenia heterogeniczne, o różnej architekturze, sprzętowej i programowej. Na architekturę węzła sieci WSN składają się: nadajnik radiowy, mikroprocesor, pamięć, źródło zasilania oraz odpowiednie czujniki, np. oświetlenia, wilgotności, akcelerometr itd. W przypadku sieci złożonych z kilkuset czy kilku tysięcy węzłów niezbędny jest wybór takiej architektury i technologii, które umożliwią względnie tanie wytworzenie poszczególnych urządzeń. W związku z tym węzły sieci sensorowych charakteryzują się niewielką prędkością przetwarzania, ograniczoną pamięcią i zasięgiem komunikacji. Oczywiście jest, że każde z urządzeń musi mieć zapewnioną energię do działania. Najczęściej stosowane jest zasilanie bateryjne, które ma niewielką pojemność. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie fotoogniw do samoczynnego pozyskiwania energii. Często stosowane są niskoenergetyczne protokoły komunikacyjne charakteryzujące się niską przepływnością i niewielkim zasięgiem. Każdy z węzłów komunikuje się tylko z węzłami znajdującymi się w jego najbliższym otoczeniu, tj. swoimi sąsiadami. Przesyłanie danych w sieci odbywa się z wykorzystaniem węzłów pośredniczących — stosowany jest schemat komunikacji wieloskokowej (ang. *multi-hop*).

Zwiększenie żywotności czujników jest jednym z kluczowych problemów rozwiązanych w procesie projektowania sieci WSN. Ma to szczególne znaczenie ze względu na fakt, że tego typu systemy są obiektem ataków cybernetycznych, a ciągłość ich działania jest krytyczna w wielu zastosowaniach. Jednym z popularnych ataków jest atak DDoS polegający na generowaniu masowej, dodatkowej komunikacji skutkującej szybkim zużyciem zasobów energetycznych węzłów. Uwzględniając powyższe, prowadzone w ostatnich la-

tach prace badawcze i badawczo-wdrożeniowe w obszarze bezprzewodowych sieci sensorowych koncentrują się m.in. na opracowaniu wydajnych, bezpiecznych, energooszczędnych protokołów transmisji pozwalających na obniżenie zużycia zasobów energetycznych urządzeń, co skutkuje wydłużeniem czasu pracy sieci [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Duży nacisk jest kładziony na rozwój nowych technologii w celu zmniejszenia rozmiarów i wagi urządzeń tworzących sieć oraz zastąpieniu zasilania z baterii wydajniejszymi i skuteczniejszymi rozwiązaniami. Ponadto prowadzone są badania nad rozszerzeniem funkcjonalności klasycznej sieci WSN. Efektem są sieci sensorów i elementów wykonawczych (Wireless Sensor Actuator Network - WSAN), czy też sieci sensorów mobilnych (Mobile Wireless Sensor Network - MWSN). Kierunki rozwoju sieci są głównie podyktowane nowymi potrzebami i zastosowaniami.

Model bezprzewodowej sieci czujników

Rozważmy sieć monitorującą S składającą się z nieupstrzeżonego zbioru S_D tworzonych przez N urządzeń pomiarowych D_i , oraz rodziny S_L tworzonej przez L połączeń międzywęzłowych, czyli uporządkowanych par urządzeń (D_i, D_j) , $i \neq j$, które w danej chwili t mogą bezpośrednio wymieniać między sobą dane. Oznaczmy przez $\mathbf{c}_i = [x_i, y_i, z_i]$ położenie i -tego urządzenia sieci, a konkretnie lokalizację jego modułu radiowego, natomiast przez r_{t_i} zasięg transmisji w chwili t . Oczywiście jest, że dwa urządzenia D_i i D_j mogą się komunikować tylko wtedy, gdy znajdują się w swoim zasięgu, a więc gdy spełniona jest zależność $\|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| \leq r_{t_i}$. Do opisu naszej sieci wykorzystamy pojęcie grafu nieskierowanego — rozważaną sieć sensorową opisuje graf $S = (V, E)$, w którym zbiorem wierzchołków V jest zbiór urządzeń tworzących sieć, $V = S_D$, a zbiorem krawędzi E rodzina dostępnych w chwili t bezpośrednich połączeń radiowych, $E = S_L$.

$$(1) \quad S = (S_D, S_L), S_D \neq \emptyset, S_L \neq \emptyset,$$

gdzie

$$(2) \quad S_D = \{D_i, i = 1, \dots, n\},$$

$$(3) \quad S_L = \{(D_i, D_j) : D_i \in S_D, D_j \in S_D, \|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j\| \leq r_{t_i}, i, j = 1, \dots, n, i \neq j\}.$$

W ogólnym przypadku zakładamy, że komunikacja w sieci S jest dwukierunkowa, tj. $(D_i, D_j) \in S_L$ i $(D_j, D_i) \in S_L$, a więc S jest grafem nieskierowanym. W niektórych zastosowaniach zakłada się, że przepływ danych między urządzeniami jest zorientowany, sieć pomiarowa może być wówczas przedstawiana jako graf skierowany, którego krawędzie spełniają warunek $(D_i, D_j) \in S_L$ oraz $(D_j, D_i) \notin S_L$.

Jak było wspomniane węzłem sieci jest urządzenie wyposażone w mikroprocesor, moduł zasilający, moduł radiowy i czujniki. Węzeł sieci może być źródłem ruchu sieciowego, jego odbiorcą lub pośrednikiem w transmisji danych między innymi, węzłami, których wzajemna komunikacja jest niemożliwa ze względu na ograniczony zasięg transmisji radiowej. Stopnie węzłów (liczby incydenentnych z nimi krawędzi) w rozważanej sieci pomiarowej, a tym samym topologia sieci, podlegają dynamicznym zmianom. Determinują je nie tylko rozlokowanie urządzeń w rozważanej przestrzeni roboczej, ale również parametry nadajnika i odbiornika radiowego oraz zmieniające się warunki środowiska wpływające na propagację fali radiowej, a więc na zasięg transmisji. Projektując lub zarządzając sieciami musimy zazwyczaj na bieżąco śledzić sąsiedztwo urządzeń tworzących sieć, a więc wyznaczać stopień każdego węzła. Przyjmujemy, że sąsiedztwem urządzenia D_i w chwili t jest zbiór N_i złożony z urządzeń sieci S , dla których w chwili t istnieje bezpośrednie połączenie z węzłem D_i , tj. $N_i = \{D_j : (D_i, D_j) \in S_L, j = 1, \dots, n, i \neq j\}$. Sąsiadami każdego węzła sieci są więc wszystkie węzły znajdujące się w danej chwili w jego zasięgu, czyli te z którymi może się komunikować. Bazując na liczbie sąsiadów i ich rozlokowaniu można tworzyć sieci o różnych topologiach. Najczęściej są to topologie typu gwiazda (ang. *star*), siatka (ang. *mesh*) lub drzewo (ang. *tree*).

Model energetyczny węzła sieci

Modelując węzeł sieci ad hoc musimy pamiętać, że zasób energii jakim dysponuje w danej chwili nasze urządzenie jest zazwyczaj ograniczony. Oznaczmy stan tego zasobu za pomocą zmiennej ξ_i . Wartość ta może odpowiadać np. poziomowi naładowania akumulatora zasilającego urządzenie. Energia jest zużywana przez różne moduły urządzenia, tj. w przypadku sieci stacjonarnych, mikroprocesor, moduł radiowy, detektory itd. W formułowanym modelu energetycznym urządzenia D_i ograniczymy się do uwzględnienia zużycia energii przez tylko dwa układy, tj. pomiarowy i komunikacyjny. Przyjmijmy, że urządzenia tworzące sieć są zazwyczaj zasilane za pomocą baterii. Oznaczmy przez ξ_i poziom naładowania baterii, $\xi_i \in [0, \xi_{i,max}]$.

Węzły sieci mogą być wyposażone w różnego rodzaju czujniki. Ograniczymy się do uproszczonego modelu opisującego działanie czujnika za pomocą zmiennej binarnej $s_i^l \in \{0, 1\}$, gdzie $l = 1, \dots, L_i$ jest numerem czujnika zainstalowanego w węźle D_i , a L_i liczbą tych czujników. Przyjmijmy, że czujnik l może działać w jednym z dwóch trybów, tj. wyłączony $s_i^l = 0$ lub włączony $s_i^l = 1$. Załóżmy, że zasięg pomiarów włączonego detektora l obejmuje powierzchnię koła o promieniu $r_{s_i}^l$ i środkiem w punkcie lokalizacji tego detektora. Przyjmijmy, że na wykonanie jednorazowego pomiaru detektor l zużywa ψ_i^l energii.

Układem zużywającym większość energii węzła jest układ radiowy. W dokumentacjach układów radiowych prezentowane są możliwe tryby pracy tego modułu i odpowiadające im wielkości poboru mocy. Przyjmijmy, że w danej chwili t , w zależności od wykonywanej operacji, moduł radiowy urządzenia D_i może pracować w jednym z K_i trybów, $e_i \in 0, 1, 2, \dots, K_i$. Niech $e_i = 1$ oznacza uśpienie, w któ-

rym moduł radiowy nie bierze udziału w komunikacji – jest wyłączony, a e_2 tryb odbierania, podczas którego urządzenie D_i jest przygotowane do odbioru danych przesyłanych przez inne węzły sieci. Pozostałe wartości $2 < e_i \leq K_i$ oznaczają sytuacje, w których moduł radiowy i -tego urządzenia nadaje, przy czym zasięg transmisji jest różny i zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału radiowego. Oznaczmy poziom mocy w stanie e_i przez $Pt_i(e_i)$. Przyjmijmy założenie, że większa wartość $e_i \in \{3, \dots, K_i\}$ oznacza nadawanie na większe odległości, a więc nadawanie z większą mocą, czyli $Pt_i(3) < \dots < Pt_i(K_i)$. Z każdym trybem działania modułu radiowego jest związane pewne zużycie energii, oznaczmy je przez $\phi_i(e_i)$. Stany e , które przyjmują popularne interfejsy komunikacji radiowej prezentuje tabela 1. Podsumowując, zmienną stanu określającą stan energetyczny urządzenia D_i w chwili t jest poziom naładowania baterii ξ_i , $\xi_i \in [0, \xi_{i,max}]$, gdzie $\xi_{i,max}$ oznacza maksymalny, możliwy poziom mocy nadawanego sygnału. Zmienne sterujące e_i , $e_i \in \{1, \dots, K_i$ i s_i^l , $s_i^l \in \{0, 1\}$ to zadawane tryby pracy modułu radiowego i L_i detektorów. Możemy sformułować równanie na zmianę poziomu naładowania baterii urządzenia D_i

$$(4) \quad \xi_i(t) = \xi_i(t-1) - \phi_i(t, e_i) - \sum_{l=1}^{L_i} (s_i^l \cdot \psi_i^l(t)) - \Theta(\xi_i, t)$$

gdzie ψ_i^l oznacza energię zużytą przez czujnik pomiarowy l , a $\Theta(\xi_i, t)$ jest nieliniowym członem opisującym proces rozładowywania się baterii urządzenia D_i .

Projektowanie energooszczędnej sieci czujników

Systemy monitorujące zbudowane na bazie bezprzewodowych sieci czujników mogą być stosowane w różnych środowiskach i sytuacjach oraz wykonywać zadania różnych typów. Zastosowanie warunkuje konstrukcję topologii sieci oraz wybór technologii do jej realizacji. Inne protokoły sieciowe są wykorzystywane w przypadku sieci obejmującej zasięgiem działania pojedynczy budynek, a inne w sytuacjach działań prowadzonych na dużym obszarze (np. wykrywanie pożarów lasu, monitorowanie środowiska naturalnego itd.). Budowa sieci ad hoc zdolnej do wykonania powierzonego jej zadania, wymaga uzyskania informacji dotyczących tworzących ją urządzeń. Znaczna część danych jest oczywiście udostępniana przez producentów sprzętu. Niemniej, w trakcie działania operacyjnego parametry i możliwości urządzeń mogą ulegać dynamicznym zmianom. W miarę upływu czasu zmniejszają się zasoby energetyczne węzłów, a tym samym moc obliczeniowa i zakres nadajnika radiowego. Podstawowe informacje, które są wymagane zarówno przy projektowaniu sieci, jak i przy przetwarzaniu danych pozyskiwanych przez sieć oraz bieżącym zarządzaniu jej działaniem obejmują:

- założoną funkcjonalność sieci oraz tryb pracy (tryb wykonywania i przesyłania pomiarów),
- liczbę aktywnych węzłów w sieci,
- położenie geograficzne węzłów sieci,
- dopuszczalną moc nadajnika radiowego,

Protokoły komunikacyjne wykorzystywane we współczesnych sieciach bezprzewodowych, takie jak IEEE 802.11, Bluetooth (IEEE 802.15.1) czy niskoenergetyczny odpowiednik standardu 802.11 ZigBee (IEEE 802.15.4) pozwalają na pracę w trybie ad hoc. Charakteryzują się one bardzo ograniczonym zasięgiem, niską przepustowością łączy i jakością transmisji. Pełne pokrycie przestrzeni roboczej w przypadku sieci rozległych wymaga zbudowania systemu pomiarowego złożonego z bardzo dużej liczby, gęsto rozlokowanych urzą-

dzeń. Protokoły MAC (*Medium Access Control*) gwarantują wydajny dostęp do medium transmisyjnego, uważnie zarządzając dostępnymi zasobami energii. Przegląd dostępnych protokołów MAC jest prezentowany w pracach [1, 9]. Wyniki badań porównawczych protokołów pod względem ich energooszczędności, przeprowadzone w środowiskach symulacyjnych są opisane w pracy [9]. Pomimo wysokiej wydajności protokołów MAC praktyczne zastosowanie sieci w trybie pracy ad hoc wymaga nadal rozwiązania kilku podstawowych problemów. Najważniejsze z nich to wspomniane wcześniej ograniczone zasoby obliczeniowe i energetyczne, niska jakość łączy oraz zmieniająca się dynamicznie topologia sieci. Istotnym problemem jest również zapewnienie bezpieczeństwa sieci. Spontaniczny sposób tworzenia sieci oraz stosowanie transmisji radiowej czyni je stosunkowo łatwym obiektem zewnętrznego ataku. Zapewnienie bezpieczeństwa w sieciach ad hoc wymaga zastosowania nowych rozwiązań, które nie występują w sieciach przewodowych o stałej infrastrukturze [10, 11].

Prace badawcze prowadzone w ostatnich latach koncentrują się m.in. na opracowaniu specjalizowanych algorytmów i protokołów, które pozwalają na rozwiązanie wymienionych powyżej problemów związanych z projektowaniem rzeczywistych sieci pomiarowych tworzonych przez bezprzewodowe czujniki [2, 3, 4, 5]. Zwięzły przegląd proponowanych w literaturze rozwiązań zawiera następujący rozdział pracy.

Sterowanie topologią

Rozlokowane w przestrzeni roboczej urządzenia tworzące sieć ad hoc oraz dostępne połączenia między nimi definiują topologię rozważanej sieci. Połączenia wynikają z zakresu transmisji radiowej realizowanej przez zainstalowane w węzłach moduły radiowe. W ostatnich latach, w literaturze poświęconej tematyce bezprzewodowych sieci ad hoc często pojawia się sformułowanie „sterowanie topologią” (ang. *topology control*). W ogólności sterowanie topologią sprowadza się do odpowiedniego rozmieszczenia węzłów sieci oraz zarządzania transmisją w taki sposób aby w efekcie uzyskać system o pożądanym własnościach. W praktycznych realizacjach oczekuje się zagwarantowania spójności sieci, długiego czasu funkcjonowania, pokrycia siecią znacznego obszaru itd., przy jednoczesnym ograniczaniu zużycia zasobów energetycznych urządzeń tworzących sieć. Różni autorzy prac przez sterowanie topologią rozumieją mniejszy lub większy zakres działań, które wpływają na strukturę, a tym samym parametry i charakterystykę sieci. G. Anastasi i inni w pracy [3] za sterowanie topologią przyjmują takie działania, które prowadzą do zapewnienia utrzymania stałej łączności z wszystkimi węzłami sieci, a więc budowę sieci spójnej. Dla P. Santi, [5] jest to odpowiednie sterowanie poziomem mocy nadawanego sygnału radiowego. Moc z jaką jest nadawany sygnał decyduje o zakresie transmisji, a więc o możliwych połączeniach międzywęzłowych. I.F. Akyildiz i M.C. Vuran [2] mówiąc o sterowaniu topologią wskazują na następujące działania, które wpływają na strukturę sieci:

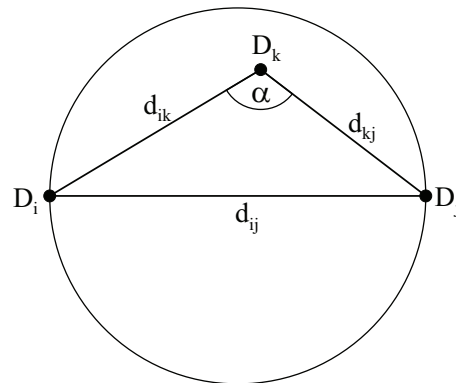
1. rozlokowanie węzłów (ang. *deployment*) – odpowiednie rozmieszczenie węzłów w przestrzeni roboczej,
2. grupowanie węzłów (ang. *clustering*) – podział węzłów na grupy w celu usprawnienia działania sieci i poprawienia wydajności,
3. sterowanie aktywnością węzłów (ang. *activity control*) – czasowe usypianie i aktywacja węzłów,
4. sterowanie poziomem mocy nadawanego sygnału (ang. *power control*) – wyznaczanie zasięgu transmisji przez sterowanie nadajnikiem radiowym.

W literaturze [2, 3, 5, 6, 7, 8] omawiane są strategie, metody i algorytmy z grupy technik sterowania topologią, które są używane do budowy energooszczędnych sieci.

Algorytmy sterowania poziomem mocy nadawanego sygnału

Algorytmy sterowania poziomem mocy nadawanego sygnału (ang. *power control* – PC) wpływają na protokoły warstwy łącza danych (MAC), jak i na protokoły trasowania tworzące warstwę sieci w modelu referencyjnym ISO/OSI. Zadaniem protokołów trasowania jest oczywiście wyznaczenie i utrzymanie najlepszej, w sensie zadanego kryterium, ścieżki między nadawcą a odbiorcą komunikatu.

Oczywiste jest, że większa moc nadawanego sygnału poprawia jakość transmisji, zwiększając jej zasięg, a tym samym zazwyczaj liczbę węzłów odbierających komunikat. Z drugiej strony obniżenie poziomu mocy sygnału skutkuje mniejszym wydatkiem energetycznym oraz zmniejsza niebezpieczeństwo wystąpienia interferencji. W związku z tym, uwzględniając ograniczenia sieci WSN, w ogólnym przypadku pożądane są krótkie transmisje. Wymagają one mniejszego zużycia energii i w mniejszym stopniu wpływają na inne, przeprowadzane równolegle transmisje, zwiększając tym samym przepustowość sieci. Rozważmy sieć prezentowaną na



Rys. 1. Twierdzenie cosinusów.

rysunku 1. Węzeł D_i wysłał komunikat, którego docelowym odbiorcą jest węzeł D_j . Przyjmijmy, że węzeł D_j znajduje się w zasięgu transmisji węzła D_i . Możliwe są dwie drogi przesłania pakietu. Pierwszą z nich jest bezpośrednia transmisja komunikatu od węzła nadawcy D_i do odbiorcy D_j . Druga ścieżka zakłada transmisję wielokrokową, z wykorzystaniem węzła pośredniczącego D_k . Komunikat jest przesyłany do węzła D_k , który następnie przekazuje go do docelowego odbiorcy D_j . Przyjmijmy, że maksymalne zasięgi transmisji węzłów D_i , D_j i D_k są takie same, równe r oraz położenie węzła D_k gwarantuje spełnienie następujących zależności: $\|x_i - x_k\| = d_{ik} < r$ i $\|x_k - x_j\| = d_{kj} < r$ oraz $d_{ik} < d_{ij}$ i $d_{kj} < d_{ij}$. Zastosujmy twierdzenie kosinusów do trójkąta utworzonego przez węzły D_i , D_j i D_k

$$(5) \quad d_{ij}^2 = d_{ik}^2 + d_{kj}^2 - 2d_{ik}d_{kj}\cos\alpha.$$

Uwzględniając założenia dotyczące położenia węzła D_k , kąt α utworzony przez boki d_{ik} i d_{kj} rozważanego trójkąta (rys. 1) przyjmuje wartości z przedziału $[\pi/2, \pi]$, a więc $\cos\alpha \leq 0$. Z równania (5) otrzymujemy $d_{ij}^2 \geq d_{ik}^2 + d_{kj}^2$. Zgodnie z przedstawionymi w pracy [5] powszechnie stosowanymi modelami propagacji radiowej w wolnej przestrzeni tłumienia sygnału rośnie wraz z kwadratem odległości między nadajnikiem i odbiornikiem. Na tej podstawie możemy wyciągnąć wniosek, że realizacja dwóch krótszych transmisji, z wykorzystaniem węzła pośredniczącego D_k , pochłonie mniej energii

niż bezpośrednie przesłanie komunikatu od nadawcy D_i do odbiorcy D_j .

Zadaniem algorytmów PC jest wyznaczenie poziomu mocy z jaką będą nadawane komunikaty. Na tej podstawie określa się zasięg transmisji i listę sąsiednich węzłów, które mogą pełnić funkcję pośredników w komunikacji. Sugerowany graf połączeń węzła jest przekazywany do warstwy sieci, gdzie jest uwzględniany przez protokoły trasowania przy wyznaczaniu optymalnej ścieżki przekazania danego komunikatu. W przypadku wystąpienia zmian w liście najbliższych sąsiadów, np. w wyniku dołączenia bądź odłączenia węzła, wyznaczone trasy są aktualizowane. Aktualizacja listy sąsiadów jednego węzła może wpływać na ścieżki przesyłania pakietów nawet do bardzo odległych węzłów. Stąd globalna zmiana ścieżek transmisji przez warstwę PC jest wydajniejsza niż aktualizacja osobno każdej ścieżki przez protokoły warstwy sieci. Protokół trasowania inicjuje działanie protokołu PC wtedy, kiedy wiele ścieżek zostało utraconych na skutek zmian, które zaszły w sieci od momentu poprzedniej aktualizacji tras. Wybór algorytmu PC determinuje wybór protokołu trasowania. Proaktywne protokoły trasowania aktualizują ścieżki przez globalną wymianę informacji o zmianach w topologii. Protokoły różnią się między sobą liczbą tabel oraz sposobem ich aktualizacji np. protokół DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) wymaga przechowywania w pamięci węzła ścieżek do wszystkich pozostałych węzłów, co w przypadku dużych sieci sensorów nie jest wskazane. Ponadto cykliczna aktualizacja znaczącej liczby ścieżek skutkuje zwiększonym zużyciem zasobów energetycznych węzłów. Reaktywne protokoły, np. AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) aktualizują trasy tylko wtedy, kiedy zachodzi taka potrzeba. Trasowanie reaktywne w porównaniu do proaktywnego nie wymaga tak dużych zasobów pamięci oraz regularnej aktualizacji ścieżek w całej sieci.

Głównym zadaniem warstwy MAC w bezprzewodowych sieciach sensorów jest kontrola dostępu do medium transmisyjnego gwarantująca uzyskanie wymaganej przepustowości sieci [9]. Węzły sieci mają przydzieloną pewną początkową maksymalną moc transmisji. Protokoły PC, znając swoich najbliższych sąsiadów, sterują przez warstwę MAC mocą transmisji tak, aby pakiety dotarły do wskazanych odbiorców.

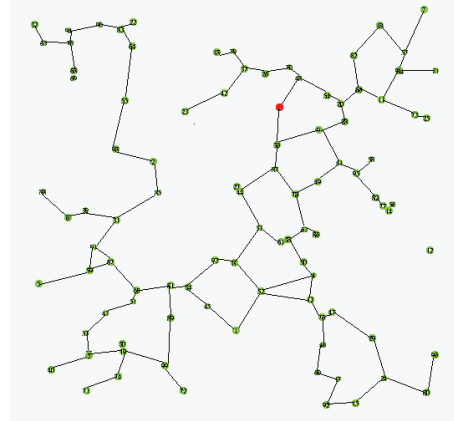
W literaturze proponowanych jest wiele algorytmów PC. Różnią się one przede wszystkim rodzajem informacji wykorzystywanej przy wyznaczaniu energooszczędnej topologii sieci. Oczywiście jest, że istnieje bezpośrednia zależność między ilością i jakością informacji a wydajnością proponowanej topologii - dysponując dokładniejszymi danymi w trakcie obliczeń uzyskujemy lepsze rozwiązania pozwalające na większe oszczędności energii. Do wyznaczenia optymalnego poziomu mocy sygnałów różne algorytmy wykorzystują różne informacje o sieci: współrzędne położenia geograficznego węzłów (np. R&M [12], LMST [13]), odległości od sąsiednich węzłów (KNeight [14], XTC [15]), kierunki, w których są rozmieszczone i identyfikatory sąsiednich węzłów (CBTC, DistRNG [5]). Informacje o lokalizacji węzłów mogą być pozyskiwane z wykorzystaniem systemu GPS lub technik lokalizacji opisanych m.in. w pracy [16]. Stosowanie GPS wymaga oczywiście wyposażenia węzła sieci w ten odbiornik, co w istotnym stopniu podnosi koszty sieci.

Przeprowadzono eksperymentalną analizę wybranych technik sterowania poziomem mocy sygnału. Rozważano sieci o różnej liczbie węzłów, strukturze i złożoności. Symulowano sytuację, w której czujniki regularnie przesyłają dane do stacji bazowej. Rysunki 2-7 prezentują przykładowe topologie wyznaczone przy założeniu zastosowania wybranych

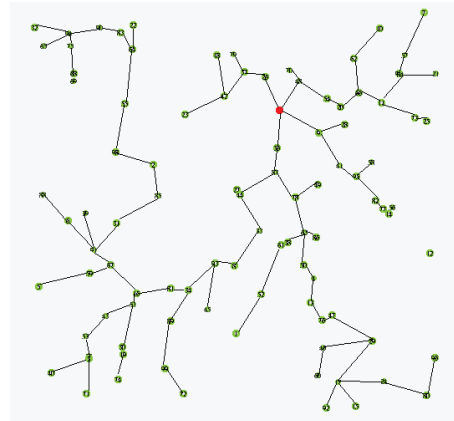
algorytmów PC do dwóch przykładowych sieci:

- sieć A: stacja bazowa zlokalizowana w centralnym punkcie sieci,
- sieć B: stacja bazowa zlokalizowana na brzegu sieci.

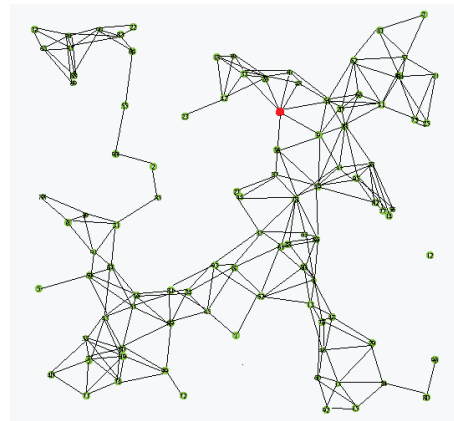
Do wyznaczenia ścieżek transmisji w sieci A zastosowano algorytmy R&M i LMST. Wygenerowane topologie prezentują odpowiednio rysunki 2 i 3. Dla porównania rysunek 4 przedstawia wszystkie trasy jakie były możliwe przy przyjętym w symulacji maksymalnym poziomie mocy nadawania przez poszczególne czujniki. Celem drugiej serii ekspery-



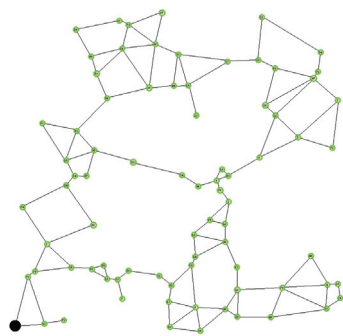
Rys. 2. Ścieżki wyznaczone przez algorytm R&M (sieć A).



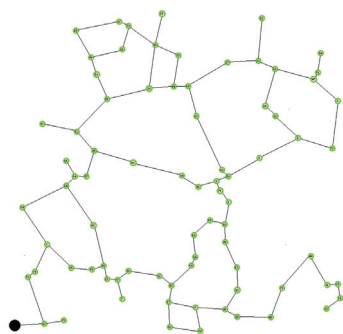
Rys. 3. Ścieżki wyznaczone przez algorytm LMST (sieć A).



Rys. 4. Możliwe ścieżki transmisji danych (sieć A).
 Rys. 5. Porównanie algorytmów KNeight i XTC. Na rysunkach 5 i 6 przedstawione są wyniki eksperymentów, w których stosując oba algorytmy wyznaczono ścieżki transmisji w sieci B. Uzyskane rezultaty porównano z wszystkimi trasami jakie były możliwe w tej sieci (rys. 7). Podsumowując, stosując różne algorytmy sterowania poziomem mocy sy-



Rys. 5. Ścieżki wyznaczone przez algorytm Kneigh (sieć B).

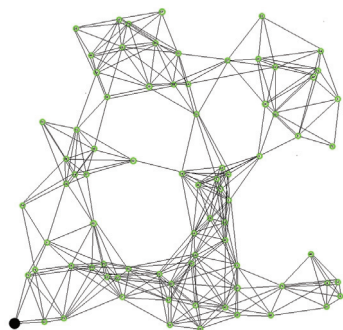


Rys. 6. Ścieżki wyznaczone przez algorytm XTC (sieć B).

gnału uzyskano różne topologie sieci, w których komunikaty były przesyłane różnymi ścieżkami. Koszt transmisji danych ścieżkami wyznaczonymi przez badane algorytmy był również różny. Niemniej, należy podkreślić, że w każdym przypadku zastosowanie algorytmów PC skutkowało obniżeniem kosztów transmisji i dłuższym czasem funkcjonowania sieci przy założonych zasobach energetycznych. Oszczędności w stosunku do sytuacji, gdy nie sterowano mocą sygnału rosły wraz ze wzrostem rozmiaru sieci [17].

Algorytmy sterowania aktywnością modułów radiowych czujników

Bezprzewodowe sieci pomiarowe są zazwyczaj tworzone przez dużą liczbę urządzeń stosunkowo gęsto rozmieszczonych w przestrzeni roboczej. Wyniki pomiarów dokonywanych przez czujniki zlokalizowane w węzłach sieci są przesyłane co pewien okres czasu, zgodnie z założonym harmonogramem lub w odpowiedzi na nowe zdarzenie. W większości zastosowań przez dłuższe okresy czasu interfejsy radiowe są bezczynne. Prezentując energetyczny model węzła sieci zwróciliśmy uwagę, że urządzenia tworzące sieć mogą pracować w różnych stanach charakteryzujących się różnym zużyciem energii. Oczywiście jest, że bardzo korzystne dla oszczędzania energii jest okresowe wyłączanie całego



Rys. 7. Możliwe ścieżki transmisji danych (sieć B).

urządzenia pomiarowego. W większości zastosowań detektory powinny wykonywać na bieżąco pomiary, a dane muszą być zapisywane w pamięci urządzenia. Znacznie częściej można usypiać lub przełączać w niskoenergetyczne stany moduł radiowy, przy działającym procesorze i urządzeniach pomiarowych. Jest to szczególnie korzystne, gdyż transmisja jest stosunkowo kosztowna energetycznie, a pobór mocy przez moduł radiowy zależy od aktualnego trybu pracy. W dostępnych na rynku urządzeniach rozróżnia się pięć trybów działania:

SLEEP VR off : głębokie uśpienie (ang. *voltage regulator off mode*) – zarówno regulator napięcia jak i oscylator (generator podstawy czasu) są wyłączone. Urządzenie pobiera znikomą ilość energii; czas wybudzania stosunkowo duży.

SLEEP VR on : płytkie uśpienie (ang. *power down mode*) – regulator napięcia jest włączony przy wyłączonym oscylatorze. Urządzenie pobiera niewielką ilość energii; krótszy czas wybudzania.

IDLE : bezczynność (ang. *idle mode*) – regulator napięcia oraz oscylator są włączone, ale układ nie wykonuje żadnych operacji. Urządzenie pobiera małą, ale istotnie większą niż w obu stanach uśpienia, ilość energii. W każdej chwili może nastąpić przełączenie w tryb odbioru lub nadawania. Bardzo szybka aktywacja.

TRANSMIT : nadawanie (ang. *transmit mode*) – włączone są główne układy, w tym regulator napięcia i oscylator. Urządzenie nadaje z różną mocą. Zasięg transmisji zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału. Zużycie energii jest znacznie większe niż w trybie bezczynności i zależy od poziomu mocy nadawanego sygnału.

RECEIVE : odbieranie (ang. *receive mode*) – podobnie jak w trybie nadawania włączone są główne układy. Urządzenie jest gotowe do odebrania danych (nasłuch) lub odbiera dane przesyłane przez inne węzły sieci. Największe zużycie energii.

W trzech pierwszych stanach przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe są wyłączone. Nie działają procesory modulatora i demodulatora. Przejście ze stanu głębokiego uśpienia (SLEEP VR off) do stanu aktywnego jest inicjowane przez procesor główny urządzenia. Kolejno włączany jest regulator napięcia, a następnie oscylator. Operacje te nie są natychmiastowe, tak więc proces aktywacji pochłania nieco czasu. Znacznie szybsze jest wybudzenie radia ze stanu płytkiego uśpienia (SLEEP VR on), gdy działa regulator napięcia i aktywacja radia nie wymaga inicjacji sygnałem zewnętrznym. W stanie bezczynności IDLE procesory modulatora i demodulatora są w stanie zawieszonym, oczekują na aktywację na instrukcji IDLE. Przełączenie radia w stan aktywny skutkuje natychmiastowym uruchomieniem procesorów, co powoduje skokowy wzrost zapotrzebowania na energię. Aktywacja z poziomu bezczynności jest bardzo szybka. W dokumentacjach popularnych modułów komunikacji radiowej stosowanych w urządzeniach zgodnych ze standardem IEEE 802.15.4 podawane jest nominalne zużycie energii dla różnych trybów działania radia oraz odpowiadający temu zużyciu zasięg nadawania. Przykładowe dane serii popularnych modułów radiowych firmy Chipcon (aktualnie Texas Instruments) służące do komunikacji zgodnej ze standardem IEEE802.15.4 w paśmie 868 MHz (CC1100) oraz 2.4 GHz (CC2420, CC2500, CC2650) prezentuje tabela 1.

Zużycie energii może więc być zredukowane przez wprowadzanie nadajnika radiowego w stan uśpienia lub bezczynności w okresach, gdy nie odbywa się intensywne wymiana danych. Jest to strategia realizowana przez algorytmy

Tryb pracy	Moc sygnału [dmB]	Zużycie mocy [W]			
		Moduł CC1100 [868 MHz]	Moduł CC2420 [2400 MHz]	Moduł CC2500 [2400 MHz]	Moduł CC2650 [2400 MHz]
Głębokie uśpienie [μ A]		0,4	0,02	0,4	0,15
Płytkie uśpienie [mA]		0,16	0,02	0,16	0,001
Bezczynność [mA]		1,6	0,426	1,5	0,55
Odbieranie [mA]		16,4	18,8	16,6	5,9
Nadawanie [mA]	-25	12,1	8,5	10,1	-
	-20	12,4	9,0	10,1	-
	-15	13,0	9,9	10,8	-
	-10	13,5	11,2	12,2	-
	-5	14,1	13,9	15,6	-
	0	16,9	17,4	21,2	6,1

Tablica 1. Dane techniczne modułów komunikacji radiowej CC1100, CC2420, CC2500 i CC2650.

sterowania aktywnością modułów radiowych urządzeń tworzących sieć – algorytmy AC (ang. *activity control*) [2, 18]. Algorytmy AC dostosowują tryb pracy urządzeń do aktualnej sytuacji w sieci. Takie działanie pozwala na ograniczenie zużycia energii, a tym samym wydłużenie czasu funkcjonowania całej sieci. Z usypianiem węzłów wiąże się niestety ograniczenie dostępnego pasma, co może w pewnych sytuacjach zakłócić przepływ danych. Bardzo ważny jest odpowiedni wybór okresów czasu, w których można wyciszyć lub wyłączyć moduły radiowe. W tym celu konieczne jest wykonanie dodatkowych operacji, co może wprowadzać dodatkowe komplikacje w protokołach sieciowych.

W literaturze opisanych jest kilka grup algorytmów AC integrujących różne techniki stosujące okresowe usypianie interfejsu radiowego. Algorytmy są klasyfikowane względem różnych kryteriów. Są one m.in. wymienione w pracy [5]. Jednym z nich jest *tryb zmiany stanu węzła*. Rozróżnia się trzy takie tryby [2]:

1. przełączanie synchroniczne,
2. przełączanie asynchroniczne,
3. zmiana stanu na żądanie (reakcja na zdarzenie).

W synchronicznych algorytmach AC zakłada się, że węzły są aktywowane co ustalony okres czasu. Następuje wówczas przesłanie zgromadzonych danych pomiarowych, odbierane są komunikaty od innych węzłów. Cykle snu wszystkich węzłów sieci są synchronizowane globalnie. W algorytmach asynchronicznych okresy snu i aktywności są wyznaczane indywidualnie dla każdego węzła - ustalany jest harmonogram aktywności. W algorytmach reagujących na żądanie węzeł jest budzony tylko w sytuacji, gdy konieczne jest przesłanie do niego danych od sąsiadującego węzła. Tego typu rozwiązanie stosuje się zazwyczaj w sieciach pomiarowych, w których czujniki przez większą część czasu zajmują się zbieraniem danych.

Kolejnym kryterium klasyfikacji algorytmów może być zakres wiedzy o sieci niezbędny do podjęcia decyzji o zmianie stanu węzłów. Wyróżnimy trzy przypadki:

1. znane lokalizacje urządzeń w przestrzeni roboczej,
2. dostępna tylko informacja o węzłach zlokalizowanych w zasięgu radiowym węzła nadawcy,
3. znana jedynie topologia sieci.

Ostatnim rozważanym kryterium jest przyjęta w algorytmie AC struktura sieci. Rozważane są trzy przypadki:

1. płaska struktura – wszystkie węzły są równoprawne,
2. podział sieci na równoprawne podsieci – grupy węzłów,
3. podział sieci na grupy i wprowadzenie hierarchii grup.

W pierwszym przypadku każdy węzeł jest traktowany w ten sam sposób, nie ma węzłów wyróżnionych. W wariantach drugim i trzecim wykorzystuje się techniki grupowania wę-

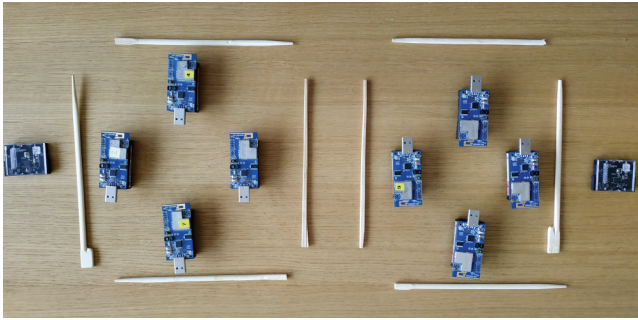
złów, np. LEACH [20], GAF [21], EEHC [19] i inne. Węzły w obrębie grupy (klastra) mogą pełnić różne funkcje, w szczególności niektóre z nich odgrywają szczególną rolę w transmisji danych. W przypadku trzecim zakłada się budowanie wielowarstwowej hierarchii klastrów. W podejściach wykorzystujących grupowanie wybierani są liderzy klastrów, z których formowana jest sieć odpowiedzialna za transmisję danych do stacji bazowej. W stanie aktywnym utrzymywane są tylko wybrane węzły tworzące grupę (aktualni liderzy klastra), pozostałe są usypiane.

Algorytmy AC oddziałują na protokoły trasowania – ścieżki transmisji obejmują jedynie aktywne węzły. Ponadto protokoły AC przekazują protokołom MAC informacje o aktualnym stanie węzła. W zależności od tego stanu ustawiany jest poziom mocy nadawanego sygnału. Warstwa MAC może wymusić uruchomienie protokołu AC w przypadku pojawienia się nowych węzłów sieci lub ich utraty, np. na skutek wyczerpania zasobów energetycznych lub utraty łączności w wyniku niekorzystnych zmian warunków atmosferycznych.

Skuteczność wybranych algorytmów sterowania aktywnością węzłów sieci została zbadana w laboratorium. Rozważano kilka niewielkich sieci o różnej strukturze, zbudowanych z urządzeń MTM-CM5000 (www.maxfor.co.kr/eng/en_sub5_1.html), wykorzystujących do transmisji protokół IEEE 802.15.4. Oceniono działanie dwóch różnych podejść do sterowania aktywnością: LEACH (Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy) [20] i GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [21]. W obu przypadkach zakłada się dekompozycję sieci i tworzy odpowiednie grupy urządzeń. W różny sposób wyznacza się liderów klastrów - węzły, które odpowiadają za zbieranie i przesyłanie danych w danej chwili czasu, niemniej szansa elekcji na lidera rośnie wraz z posiadanymi aktualnie zasobami energetycznymi. W przypadku algorytmu GAF wymagana jest znajomość lokalizacji węzłów. W eksperymentach wykorzystano zmodyfikowane wersje obu algorytmów – algorytm GAF w wersji przedstawionej w pracy [22] oraz wersję *multi-hop* algorytmu LEACH opisaną w pracy [23]. Wyniki przykładowych testów prezentują tabele 2 i 3.

Pierwsza sieć, w której badano działanie algorytmu GAF, została zbudowana z ośmiu węzłów MTM-CM5000 (Fig. 8). Tabela 2 zawiera czasy funkcjonowania poszczególnych urządzeń w przypadku, gdy sterowano aktywnością węzłów za pomocą algorytmu GAF (pierwszy wiersz) oraz w przypadku, gdy wyłączono algorytmy oszczędzające energię (drugi wiersz).

Algorytm LEACH testowano w sieci zbudowanej z dziesięciu urządzeń MTM-CM5000 (rys. 9). Wyniki badań prezentuje tabela 3. Podobnie jak w przypadku GAF pierwszy



Rys. 8. Sieć testowa dla algorytmu GAF.

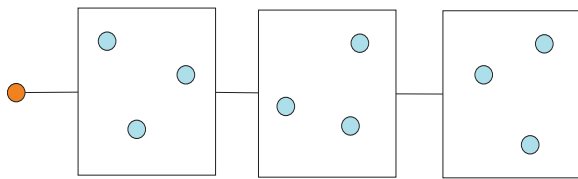
Tablica 2. Czasy funkcjonowania wszystkich węzłów sieci.

Protocol	Klaster 1 [min]				Klaster 2 [min]			
GAF	88	100	103	109	106	109	112	118
Bez AC	31	31	31	32	32	34	34	34

Tablica 3. Czasy funkcjonowania wszystkich węzłów sieci.

Protocol	Klaster 1 [min]			Klaster 2 [min]			Klaster 3 [min]		
LEACH	41	43	48	46	50	52	48	53	55
Bez AC	30	31	32	32	33	35	33	36	37

wiersz w tabeli pokazuje czasy działania węzłów sieci w przypadku, gdy sterowano aktywnością modułów radiowych urządzeń, a drugi, gdy wyłączono algorytm sterowania aktywnością.



Rys. 9. Schemat sieci testowej dla algorytmu LEACH.

Wyniki obu eksperymentów potwierdziły, że zastosowanie algorytmów sterowania aktywnością węzłów sieci pozwala na wydłużenie czasu jej funkcjonowania. Ponadto stwierdzono eksperymentalnie, że skuteczność algorytmów wzrasta wraz z gęstością sieci.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono model energooszczędnej sieci czujników pomiarowych. Omówiono różne podejścia do sterowania topologią sieci w celu wydłużenia czasu jej funkcjonowania, przy założeniu ograniczonych zasobów energetycznych. Zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych potwierdzają skuteczność omawianych technik zakładających wykorzystanie możliwości sterowania poziomem mocy nadawanego sygnału oraz aktywację i usypianie modułu radiowego urządzeń pomiarowych.

Podziękowanie. Praca wykonana w ramach projektu CYBERSECIDENT/369195/I/NCBR/2017, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu CyberSecident.

Autorzy: Prof. dr hab. inż. Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, email: ens@ia.pw.edu.pl
dr inż. Andrzej Sikora, Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa (NASK), ul. Kolska 12, 01-045 Warszawa, email: andrzej.sikora@nask.pl.

LITERATURA

- [1] Ilyas M., I. Mahgoub I.: Handbook of Sensor Networks Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC Press, 2005.
- [2] Akyildiz I.F., Vuran M.C.: Wireless Sensor Networks, John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [3] Anastasi G., Conti M., Di Francesco M., A. Passarella A.: Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, Ad Hoc Networks, 7, pp. 537–568, 2009.
- [4] Pantazis N.A., Nikolidakis S.A., Vergados D.D.: Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey, IEEE Communications Surveys Tutorials, 2013.
- [5] Santi P.: Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [6] Amgoth T., Jana P.K.: Energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks, Computers & Electrical Engineering, 41, pp. 357–367, 2015.
- [7] Zanaž E., Enesi I., Zanaž B.: Energy Aware Algorithms for Wireless Sensor Networks, Procedia Computer Science, 105, pp. 105–110, 2017.
- [8] Sajwan M., Gosain D., Sharma A.K.: Hybrid energy-efficient multi-path routing for wireless sensor networks, Computers & Electrical Engineering, 67, pp. 96–113, 2018.
- [9] Shukur M.I., Chyan L.S., Yap V.V.: Wireless sensor networks: delay guarantee and energy efficient MAC protocols, World Academy of Science, Engineering and Technology, 50, pp. 1061–1065, 2009.
- [10] Dener M.: Security Analysis in Wireless Sensor Networks, International Journal of Distributed Sensor Networks, 10(10), 2014.
- [11] Xiankleber C.B., Gama F.O.S., Semente R.S., Villareal E.R.L., Salazar A.: Development and Analysis of a Cryptographic Algorithm for Genetically Optimized Wireless Sensor, Przegląd Elektrotechniczny, 8(94), pp. 79–84, 2018.
- [12] Rodoplu V., Meng T.: Minimum energy mobile wireless networks, IEEE Journal Selected Areas on Mobile Computing, 8(17), pp. 1333–1344, 1999.
- [13] Li N., Hou J., Sha L.: Design and analysis of an mst-based topology control algorithm, Proceedings of IEEE Infocom 03, 8(17), pp. 1702–1712, 2003.
- [14] Blough D.M., Leoncini M., Resta G., Santi P.: The k-neighbors approach to interference bounded and symmetric topology control in ad hoc networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, 5, pp. 1267–1282, 2006.
- [15] Wattenhofer R., Zollinger A.: XTC: A Practical Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Networks, Proc. of the 4th Inter. Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN), 2003.
- [16] Niewiadomska-Szynkiewicz E.: Optimization schemes for wireless sensor network localization, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2(19), pp. 291–302, 2009.
- [17] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Kwaśniewski P., Windyga I.: Comparative Study of Wireless Sensor Networks Energy-Efficient Topologies and Power Save Protocols, Journal of Telecommunications and Information Technology, 3, pp. 68–75, 2009.
- [18] Ogundile O.O., Alfa A.S.: A Survey on an Energy-Efficient and Energy-Balanced Routing Protocol for Wireless Sensor Networks, Sensors, 17(5), 2017.
- [19] Bandyopadhyay S., Coyle E.J.: Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors, Computer Networks, 44(1), pp. 1–16, 2004.
- [20] Tyagi S., Kumar, N.: A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks, Journal of Network and Computer Applications, 2(36), pp. 623–645, 2013.
- [21] Xu Y., Heidemann J., Estrin D.: Geography-informed energy conservation for ad hoc routing, Proc. of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), pp. 70–84, 2001.
- [22] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Marks M., Nabrdalik F.: Testbed Implementation of Energy Aware Wireless Sensor Network, Military Communications and Information Technology, pp. 319–331, 2012.
- [23] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Nabrdalik F.: Secure low energy AODV protocol for wireless sensor networks, 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference - ITNAC 2017, pp. 1–6, 2017.