

Piotr KIEDROWSKI\*

## ZASTOSOWANIE PROTOKOŁU HOT POTATO W STEROWANIU OŚWIETLENIEM DROGOWYM – ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI RUCHOWYCH W OPARCIU O TEORIĘ GRAFÓW

W pracy przedstawiono metodę obliczania czasu komunikacji między oprawami latarni a węzłem akwizycji i dystrybucji danych w sieci telemetrycznej przeznaczonej do sterowania oświetleniem drogowym. Prezentowana metoda dotyczy wszystkich sieci komunikacyjnych, w których dla powiększenia zasięgu stosuje się technikę multi-hop. Oprawy źródła światła drogowego traktowane są jako węzły sieci telemetrycznej wykorzystujące do komunikacji wspólne medium. W pracy rozważono dwie technologie transmisji: bezprzewodową w paśmie ISM oraz przewodową PLC wykorzystującą do transmisji przewody przeznaczone do zasilania latarni. Zastosowanie protokołu routinguowego hot-potato wynika ze specyficznej topologii sieci, jaką tworzy ciąg latarni drogowych, tzn. połączenia kaskadowego. W przypadku takiej topologii sieci, jak również uwzględniając liczbę węzłów obsługiwanych przez pojedynczy węzeł akwizycji i dystrybucji danych, protokół hot-potato jest ciągle wydajny przy zachowaniu swej głównej zalety, jaką są małe wymagania w zakresie zasobów obliczeniowych oraz pamięci RAM i ROM.

SŁOWA KLUCZOWE: Smart Lighting, Smart Grid, sterowanie indywidualne, oświetlenie drogowe, oświetlenie uliczne, PLC, WSN

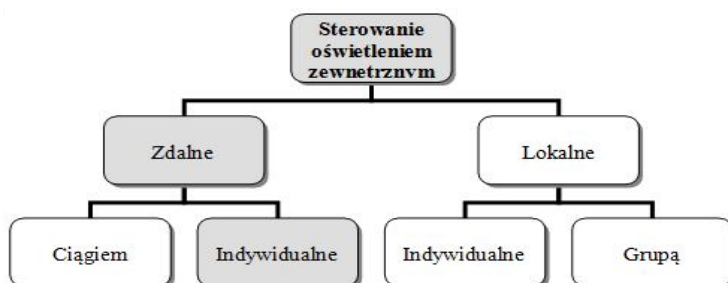
### 1. WPROWADZENIE

Sterowanie oświetleniem drogowym stosuje się przede wszystkim w celu zmniejszenia kosztów oświetlenia dróg i ulic. Poza zmniejszeniem kosztów istotnym jest również zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> związanym z produkcją energii elektrycznej. Według [1] szacuje się, że w Polsce ok. 20% całkowitego zużycia energii elektrycznej konsumowane jest na oświetlenie, z tego znaczna część na oświetlenie drogowe. Zmniejszenie zużycia energii realizuje się na kilka sposobów, ważniejsze z nich to: zastosowanie sprawnych energetycznie źródeł; redukcja natężenia światła w określonych sytuacjach z zachowaniem wymaganych parametrów świecenia; precyzyjne sterowanie chwilami włączania, wyłączania i redukcji oświetlenia; uwzględnienie sprawności źródeł światła w czasie ich eksploatacji długo i

\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

krótkoterminowej (tu w szczególności źródeł LED); sposoby utrzymania i konserwacji systemu oświetlenia oraz uwzględnienie warunków termicznych.

Obecnie najpopularniejszą metodą sterowania oświetleniem drogowym jest regulacja wartości napięcia zasilania całego odcinka (ciągu) drogowego z precyzyjnym uwzględnieniem chwili włączeń, wyłączeń i redukcji wartości napięcia w zależności od miejsca geograficznego. Mimo oczywistych oszczędności rozwiązanie takie ma dwie zasadnicze wady. Pierwsza wada to brak możliwości sterowania oświetleniem LED, którego natężenie światła nie jest regulowane napięciem; druga wada to brak możliwości zdalnego sterowania pojedynczą latarnią w ciągu, a jedynie zdalne sterowanie całym ciągiem. Na poniższym rysunku przedstawiono sposoby sterowania oświetleniem zewnętrznym.



Rys. 1. Sposoby sterowania oświetleniem zewnętrznym

Sposób klasyfikacji prezentowany na rysunku 1 służy jedynie łatwiejszemu zrozumieniu niniejszego artykułu. Sterowanie lokalne to takie, kiedy sterownik znajduje się w obszarze oświetlanym przez sterowane źródło. Przykładem sterowania lokalnego oświetleniem może być sterowanie z wykorzystaniem sensorów ruchu.

Przykładem zdalnego sterowania ciągiem lub jego odcinkiem jest najpopularniejsza obecnie stosowana metoda sterowania oświetleniem drogowym i ulicznym z wykorzystaniem centralnego reduktora napięcia.

Przedmiotem niniejszej pracy jest zdalne sterowanie indywidualne z wykorzystaniem dwóch niezależnych technologii transmisji: bezprzewodową w paśmie ISM oraz przewodową PLC (ang. Power Line Communication). Możliwe jest również zastosowanie technologii hybrydowej bezprzewodowej ISM i PLC. Zdalne sterowanie indywidualne ma ogólniejsze zastosowanie niż zdalne sterowanie ciągiem i zawsze umożliwia sterowanie w obu trybach zdalnych. Istniejące obecnie systemy zdalnego sterowania indywidualnego wykorzystujące technikę PLC są w fazie instalacji demonstracyjnych lub pilotażowych i opierają się głównie na starszych technologiach PLC i technologii ZigBee. Sytuacja taka wynika z dwóch powodów, tzn. oczekiwania na nowe przepisy [2] określające nowe wymagania i normy w zakresie oświetlenia drogowego oraz definicji nowego standardu interfejsu PLC-

PRIME, obejmującego nie tylko pasmo transmisji CELENEC A, ale również pasma znajdujące się w zakresie powyżej 100 kHz [3, 4].

Powyższe rozwiązania znalazły zastosowania w Smart Metering, będącym częścią komunikacyjną systemu Smart Grid. W odróżnieniu do Smart Metering, gdzie topologią charakterystyczną była siatka [5], w systemach Smart Lighting mamy do czynienia z topologią kaskadową, jako naturalną konsekwencję instalacji latarni wzdłuż dróg. W przypadku, gdy sieć ma topologię kaskadową oraz kierunek transmisji danych jest rozróżnialny przez węzły, protokół hot-potato jest szczególnie wydajny w rozumieniu szybkości wymiany informacji, niezawodności i małych wymagań [6].

## 2. CHARAKTERYSTYKA PROTOKOŁU HOT-POTATO

Protokół hot-potato został po raz pierwszy opublikowany w [7], jako alternatywa dla protokołów typu store-and-forward. Protokół hot-potato nazywany jest również deflekcyjnym protokołem routingowym [6]. Przekazywane pakiety nie są kolejgowane, w przypadku, gdy optymalna droga jest zajęta, lecz kierowane są inną drogą. Zakładając, że optymalna droga nie jest zajęta lub inne drogi są skierowane we właściwym kierunku (tak jak w przypadku kaskady), protokół hot-potato będzie szybszym protokołem routingowym w porównaniu z tymi stosowanymi w Smart Metering [8]. Kolejną zaletą protokołu hot-potato to niska emisyjność i brak kolizji w odróżnieniu do protokołów typu „flooding”. W systemach wykorzystujących wspólne medium transmisyjne, takich jak bezprzewodowe czy PLC, węzeł odbierając pakiet nie zna adresu węzła, który go nadał. Dlatego w rozważanym przypadku konieczne jest wprowadzenie dodatkowego, trzeciego adresu węzła pośredniczącego. Takie rozwiązanie, wymaga istnienia w węzłach tablicy, zawierającej listę sąsiadów (nie koniecznie wszystkich), co i tak jest rozwiązaniem o wiele korzystniejszym (z punktu widzenia obciążenia pamięci) od przechowywania tablic routingowych opisujących całą sieć. Ponadto ze względu na 24 godzinny cykl włączania i wyłączania (odmiennie niż w Smart Metering) oświetlenia, rozwiązanie polegające na zbieraniu informacji o łączach z całej sieci jest nie do przyjęcia, gdyż wymaga czasu. W przypadku hot-potato węzeł musi znać tylko adresy węzłów sąsiednich i identyfikator opisujący jakość łączy do tych węzłów. Identyfikator jakości łączy najczęściej tworzony jest na podstawie wartości mocy odbieranego sygnału i odstępu sygnału od szumu.

## 3. UKŁADY TOPOLOGICZNE

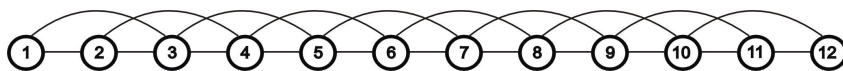
Jak już sygnalizowano, węzły komunikacyjne latarni tworzą sieci o innej topologii niż np. liczniki energii elektrycznej, mimo że w obydwu przypadkach stosuje się te same rozwiązania elektroniczne, czyli SRD (ang. Short Range

Devices). Podobnie jak w sieciach AMR (ang. Automatic Meter Reading) liczba łączy w sieci jest zmienna w czasie, jako konsekwencja zmiennych warunków propagacyjnych. Z własnych obserwacji (w systemach telemetrycznych do zdalnego odczytu liczników energii elektrycznej) wynika, że stosując technologie bezprzewodowe w paśmie 433 MHz i 868 MHz zmiany warunków propagacyjnych mają wolniejszy charakter niż w przypadku technologii PLC.

W przypadku (opisywanej) sieci o dużym zagęszczeniu, dużej liczbie węzłów, gdzie wykorzystywane jest wspólne medium, z reguły mamy do czynienia z nadmiarem łączy. Z jednej strony nadmiar łączy komplikuje procedury routingowe, z drugiej rozładowuje ruch. Biorąc po uwagę przeznaczenie opisywanej sieci można stwierdzić, że ruch jest znikomy, a prostota schematu komunikacyjnego jest pożądana. To powody, dla których zastosowanie hot-potato wydaje się być najwłaściwszym rozwiązaniem.

### 3.1. Układy topologiczne dla połączeń bezprzewodowych

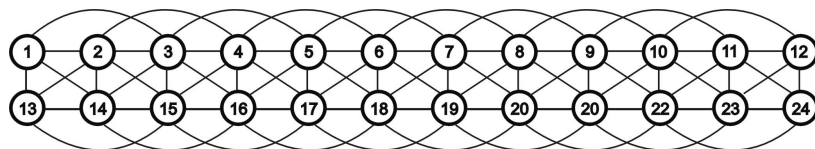
Stosując rozwiązania bezprzewodowe w paśmie ISM 433 MHz lub 868 MHz, gdzie maksymalna, dopuszczalna, wyemitowana moc wynosi 10 mW, zasięgi transmisji wynoszą kilkaset metrów. Biorąc pod uwagę odstęp między latarniami, które wynoszą kilkadziesiąt metrów mamy do czynienia z sytuacją, w której węzły mają bardzo dużo sąsiadów, z którymi są połączone zawodnymi łączy. Na rysunku 2, w postaci grafu, przedstawiono typowy, ogólny układ topologiczny, jaki tworzą latarnie posiadające jedną oprawę, gdzie do transmisji, wybrano najlepsze (i najkrótsze) łącza do czterech sąsiadów.



Rys. 2. Graf opisujący sieć w ciągu drogowym oświetlanym latarniami posiadającymi jedną oprawę

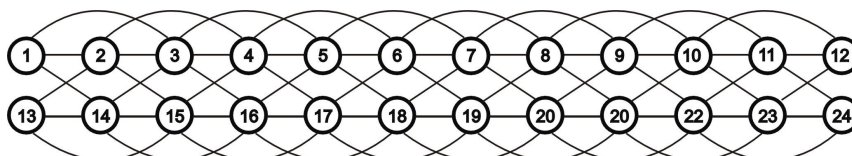
Oprócz węzłów brzegowych, wszystkie pozostałe to węzły czwartego stopnia, posiadające dwa łącza krótkie i jedno dłuższe tzn. łącza pomiędzy węzłami  $(n)$  i  $(n+1)$  oraz węzłami  $(n)$  i  $(n+2)$ , odpowiednio.

Dla identycznego kryterium doboru węzłów sąsiednich, lecz innego układu topologicznego, na rysunku 3 przedstawiono graf dla latarni posiadających po dwie oprawy, węzły  $(n)$  i  $(n+12)$  są w niewielkiej odległości od siebie.



Rys. 3. Graf opisujący sieć w ciągu drogowym oświetlanym latarniami posiadającymi po dwie oprawy

Oczywiście można zaprezentować grafy dla latarni posiadających trzy, cztery a nawet pięć opraw. Istotny z punktu widzenia zależności ruchowych w sieci jest fakt, że łącza (pionowe) pomiędzy węzłami  $(n)$  i  $(n+12)$  są zbyteczne, bo odbierają te same informacje i nie muszą ich sobie przekazywać. Na rysunku 4 zaprezentowano graf, gdzie łącza pomiędzy węzłami opraw zainstalowanych na tym samym słupie wyeliminowano.



Rys. 4. Graf opisujący sieć w ciągu drogowym jak na rysunku 3, w której zostały wyeliminowane łącza pomiędzy węzłami opraw zainstalowanych na tym samym słupie

Oprócz wspomnianej wcześniej niezasadności stosowania łączy „pionowych”, wynikających z właściwości ruchowych, kolejny problem to brak możliwości przekształcenia grafu zaprezentowanego na rysunku 3 w graf skierowany. W praktyce prowadzić to będzie do wyboru (przez węzeł) dróg nieoptymalnych z prawdopodobieństwem  $p/D$ , gdzie  $p$  to liczba łączy pionowych, a  $D$  stopień węzła.

### 3.2. Układy topologiczne dla połączeń PLC w trójfazowej sieci nN

Stosując rozwiązania komunikacyjne w oparciu o technikę PLC, transmisja odbywa się nie w jednym, lecz w trzech wspólnych mediach, jako konsekwencja trójfazowego zasilania ciągu drogowego. Węzeł akwizycji i dystrybucji danych (WADD) posiada trzy porty fizyczne PLC lub sprzężenie pojemnościowe umożliwiające transmisję z jednej fazy do drugiej. Pierwsze rozwiązanie jest nieco droższe, ale korzystniejsze; WADD oprócz swych podstawowych funkcji pełni rolę routera łączącego trzy podsieci, a w przypadku drugiego rozwiązania jedynie huba.

W odróżnieniu od rozwiązań bezprzewodowych, przy zastosowaniu PLC nie występuje problem nadmiaru łączy albo jest on znacznie mniejszy. Sytuacja taka wynika z trzykrotnie mniejszej liczby węzłów w każdej sieci oraz z faktu, że oprawy zasilane są różnymi fazami naprzemiennie, co nawet trzykrotnie zwiększa odstęp między węzłami.

## 4. METODYKA MODELOWANIA I ANALIZY

Graf może opisywać sieć, w tym sieć komunikacyjną do sterowania np. oświetleniem drogowym. Z kolei każdy graf można opisać jako macierz przyległości  $[MP]$ , która opisuje wzajemne związki między węzłami sieci [9].  $[MP]$  jest macierzą kwadratową o wymiarach  $w \times w$  (gdzie  $w$  to liczba węzłów w

sieci). Elementy  $[MP]$  mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{0; 1\}$  zgodnie z zasadą:

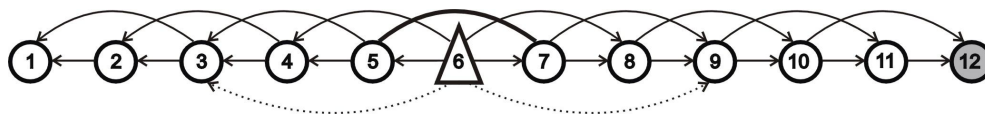
- $mp_{ij} = 1$  kiedy istnieje krawędź łącząca od węzła  $w_i$  do węzła  $w_j$ ,
- $mp_{ij} = 0$  kiedy nie istnieje krawędź łącząca od węzła  $w_i$  do węzła  $w_j$ .

W sieciach komunikacyjnych krawędź to łącze jednokierunkowe.

Wartości elementów  $mp_{ij}$  macierzy  $[MP]^h$  określają liczbę możliwych tras pomiędzy węzłem  $i$  a  $j$  o długości  $h$  [10]. Długość trasy to liczba skoków.

W analizie właściwości ruchowych liczba tras jest przydatną informacją w przypadku stosowania techniki transmisji multi-path. Multi-path zawsze towarzyszy technika multi-hop. W przypadku zastosowania protokołu hot-potato nie stosuje się techniki multi-path, a jedynie multi-hop [5]. Dlatego w analizie właściwości ruchowych sieci opartych wyłącznie na multi-hop przydaną informacją jest liczba skoków potrzebna do komunikacji między parami węzłów, wraz z prawdopodobieństwem wystąpienia takiego zdarzenia, a nie liczba możliwych tras. W tym celu zamiast macierzy  $[MP]$  należy zastosować macierz, nazwijmy  $[MPP]$ , której elementami są wartości prawdopodobieństwa, że węzeł  $i$  przekaże informację dalej do węzła  $j$ . Transformacja  $[MP]$  do  $[MPP]$  polega na zastąpieniu jedynie wartości elementów macierzy  $mp_{ij} = 1$  wartością z zakresu  $[0; 1]$ , zgodnie z prawdopodobieństwem wyboru takiej trasy przez węzeł przekazujący. Węzeł docelowy nigdy nie jest węzłem przekazującym, dlatego wszystkie elementy wiersza macierzy  $[MPP]$  o numerze równym numerowi węzła docelowego są równe 0. Zakładając, że węzeł docelowy ma numer  $j$ , to macierz  $[MPP]$  z wyzerowanymi elementami wiersza  $j$  zapisywana będzie jako  $[MPP]_j$ .

Sposób tworzenia macierzy  $[MPP]_j$  można również wyjaśnić na przykładzie. Dla sieci jak na rysunku 2, zakładając, że węzeł 6 jest WADD oraz węzły 5 i 7 muszą traktować łącze 5-7 jako dwukierunkowe, to graf opisujący taką sieć przedstawiono na rysunku 5. Łącza oznaczone linią przerywaną nie uwzględniono w analizie przeprowadzonej w tym rozdziale.



Rys. 5. Graf opisujący możliwe trasy z węzła numer 6 do pozostałych węzłów sieci

Dla grafu z rysunku 5, zakładając, że węzeł 12 jest węzłem docelowym, macierz  $[MPP]_{12}$  ma postać jak poniżej.

Wartości elementów macierzy  $[MPP]_{12}^h$   $mpp_{6,12}$  określają wartość prawdopodobieństwa dotarcia informacji z węzła 6 do węzła 12 po  $h$  skokach. Wartość takiego prawdopodobieństwa oznaczana będzie jako  $p_{i,j}(h)$ .

$$[MPp]_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Do analizy porównawczej użyty zostanie parametr ETX (ang. Expected Transmissions), który powszechnie jest stosowany w analizie sieci WSN (ang. Wireless Sensor Network). Parametr ETX to prognozowany lub wyznaczony z próby wskaźnik, określający liczbę nadań pakietu lub jego kopii przez węzły sieci w celu przesłania go między dwoma węzłami. W przypadku protokołu hot-potato ETX jest również prognozowaną długością trasy lub po prostu prognozowaną wartością liczby skoków wymaganych do komunikacji między  $i$  a  $j$ . Dla protokołu hot-potato wartość ETX można obliczyć z poniższej formuły.

$$ETX_{i,j} = \sum_{h=1}^m h \cdot p_{i,j}(h) \quad (1)$$

gdzie  $m$  to zmienna taka, że  $p_{i,j}(h > m) = 0$ .

Bardzo często  $m$  ma wartość nieskończoną, wtedy z (1) można obliczyć jedynie estymator ETX, oznaczany dalej, jako  $\hat{ETX}_{i,j}$ . Protokół hot-potato nie wymaga stosowania czasu zwłoki w procesie przekazywania pakietów, dlatego bardzo łatwo oszacować czas komunikacji będący iloczynem: długości ramki, prędkości transmisji i liczby skoków. Z zależności (2) można obliczyć prawdopodobieństwo dotarcia pakietu z określoną liczbą skoków (w określonym czasie) -  $f_{i,j}(h)$ .

$$f_{i,j}(h) = \sum_{n=1}^h p_{i,j}(n) \quad (2)$$

Zależność (2) ma duże zastosowanie praktyczne, pozwala np. na określanie czasu oczekiwania na odpowiedź czy czasu, po którym należy wysłać ponowne zapytanie.

Do oceny efektywności protokołu w połączeniu  $i$ - $j$  proponuje się wykorzystanie współczynnika efektywności  $E_{i,j}$  zdefiniowanego w następujący sposób:

$$E_{i,j} = \frac{ETX_{i,j}}{SP_{i,j}} \quad (3)$$

gdzie: SP to długość najkrótszej trasy.

## 5. PRZYKŁADOWE ROZWIĄZANIA IMPLEMENTACYJNE

Do dalszej analizy w tabeli 5.1 zestawiono wartości  $p_{i,j}(h)$  i  $f_{i,j}(h)$  uzyskane dla przykładu z poprzedniego rozdziału i grafu zaprezentowanego na rysunku 5.

Tabela 5.1. Parametry ruchowe ścieżki 6-12 dla układu topologicznego z rys. 5

| <b>h</b> | 1 | 2 | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10     | 11     |
|----------|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| <b>p</b> | 0 | 0 | 0,083 | 0,122 | 0,074 | 0,033 | 0,013 | 0,005 | 0,002 | 0,0006 | 0,0002 |
| <b>f</b> | 0 | 0 | 0,083 | 0,205 | 0,279 | 0,313 | 0,326 | 0,331 | 0,332 | 0,333  | 0,3332 |

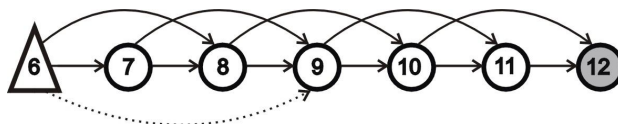
Estymator wartości ETX dla  $m = 11$  wynosi około 1,8, a długość najkrótszej trasy SP wynosi 3. Wartość  $f_{6,12}$  jest bardzo mała i praktycznie od  $h = 8$  nie wzrasta wraz z liczbą skoków. Jeżeli  $ETX < SP$  oznacza to, że część prób komunikacji w ogóle nie dochodzi do skutku nie ze względów zawodności łączy a rozwiązań systemowych – współczynnik  $E$  nie może być mniejszy od 1. Zjawisko to łatwo wyjaśnić analizując graf z rysunku 5. Jeżeli węzeł 6 skieruje pakiet do węzła 4 (prawdopodobieństwo takiego zdarzenia wynosi 0,25) to pakiet nigdy nie dotrze do węzła 12; jeżeli 6 skieruje pakiet do 5 (prawdopodobieństwo 0,25) to z prawdopodobieństwem 1/3 zostanie on przesłany do 7; z 7 może być przekazany do 8 albo 9, ale również z powrotem na lewą stronę od 6. Ta niekorzystna sytuacja wynika z faktu, że łącze 5-7 jest dwukierunkowe. Zmiana łącza 5-7 na jednokierunkowe - od 5 do 7 poprawia parametry ruchowe do węzła 12, ale pogarsza do 1. Jest to drugi powód (pierwszy powód podano w 3.1), dla którego należy eliminować łącza dwukierunkowe. Trzeci powód to problemy implementacyjne, np. komplikacja algorytmu protokołu w module węzła oprawy.

Eliminując łącze 5-7, elementy macierzy  $mpp_{5,7} = 0$  i  $mpp_{5,7} = 0$ , a  $mpp_{5,4}$ ,  $mpp_{5,3}$ ,  $mpp_{7,8}$ ,  $mpp_{8,9}$  zmieniają wartość z 1/3 na 1/2. Dla tak zmodyfikowanej macierzy  $[MPP]_{12}$  estymator wartości ETX dla  $m = 11$  wynosi około 1,6 jest zatem korzystniejszy niż przed modyfikacją, ale współczynnik  $E_{6,12}$  wynosi ok. 0,53 czyli mamy do czynienia z błędem systemowym. Wartość  $f_{6,12}(h > 5) = 0,5$ , czyli również dla nieskończenie dużego  $h$ , gdzie wartość  $f$  dla takiego  $h$  musi wynieść 1. Sytuacja taka jest spowodowana tym, że spośród czterech łączy WADD jedynie 2 (50% wszystkich) skierują pakiet we właściwym kierunku.

O ile nie można ze względów implementacyjnych komplikować algorytmu w węzle oprawy, o tyle węzeł WADD ma wystarczającą ilość pamięci, aby do tablicy wszystkich węzłów sieci (którą już posiada) dodać dane o preferowanym łączy lub łączach, przez które ma się z nimi komunikować. Bardziej eleganckim rozwiązaniem jest stworzenie tablicy łączy własnych i przyporządkowanie im adresów węzłów oprawy.

Stosując takie rozwiązania graf z rysunku 5 ulega modyfikacji i wygląda jak na rysunku 6.





Rys. 6. Docelowa postać grafu opisującego możliwe trasy z węzła numer 6 do pozostałych węzłów sieci (po modyfikacji algorytmu wyboru łączy w WADD)

Po dokonaniu modyfikacji algorytmu w WADD, dla grafów zaprezentowanych w rozdziale 3 w komunikacji węzeł 6 - pozostałe węzły, średnie wartości  $ETX_{6,j}$  i  $E_{6,j}$  zestawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Średnie wartości  $ETX_{6,j}$  i  $E_{6,j}$  dla grafów z rozdziału 3

| graf        | Rys. 2 | Rys. 4 | Rys.5<br>z uwzględnieniem dodatkowych dwu łączy |
|-------------|--------|--------|---|
| $ETX_{6,j}$ | 2,109  | 2,885  | 1,875   |
| $E_{6,j}$   | 1,411  | 2,055  | 1,333   |

Otrzymane wyniki łatwo jest interpretować. Sieć reprezentowana grafem z rysunku 4 ma gorsze parametry od tej z rysunku 2, ponieważ posiada więcej węzłów i łączy, w tym 75% to łączy krótkie. Sieć reprezentowana grafem z rysunku 5 ma lepsze parametry od tej z rysunku 2, ponieważ posiada dwa dodatkowe długie łączy wychodzące z WADD. Większa liczba łączy długich wychodzących z WADD wynika z faktu, że ten może być wyposażony w antenę o lepszych parametrach. W przypadku technologii PLC takiej zasady nie można przyjąć.

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy metody badania właściwości ruchowych dotyczą wszystkich rodzajów sieci, w których wykorzystywany jest protokół hot-potato. Zaproponowana metoda wymiernej oceny właściwości ruchowych umożliwia porównanie parametrów sieci wykorzystującej hot-potato z siecią o identycznej topologii, w której wykorzystano „idealny” protokół umożliwiający wybór najkrótszej ścieżki, co stanowi pośrednią metodę do porównania hot-potato z innymi protokołami routingowymi. Porównując uzyskane wartości współczynnika efektywności protokołu hot-potato z innymi protokołami [11, 12] można stwierdzić, że idealnie nadaje się on do zastosowania w sterowaniu oświetleniem drogowym (albo innych sieciach o podobnych układach topologicznych), ponieważ posiada w większości przypadków lepszy współczynnik efektywności. Wyjątek stanowią dwa protokoły, z których jeden charakteryzuje aż pięciokrotnie większą wartością ETX, a drugi wymaga długiego czasu samokonfiguracji, co jest czynnikiem dyskwalifikującym ze względu na 24 godzinny cykl regulacji

oświetleniem drogowym. Protokół hot-potato znalazł wiele zastosowań na przestrzeni ostatnich 50 lat. Zdaniem autora protokół hot-potato będzie znajdować coraz większe zastosowanie w wielu innych obszarach (takich jak te opisane w [6] czy [13]) klasyfikowanych, jako systemy komunikacyjne dla Smart Grid.

## LITERATURA

- [1] Górczewska M., Mroczkowska S., Skrzypczak P., Badanie wpływu barwy światła na oświetleniu drogowym na rozpoznawalność przeszkód, *Electrical Engineering*, No. 73, 2013, pp. 165-172.
- [2] PN-EN 13201 – 2007, Oświetlenie dróg (prEN 13 201 – 2014 Current Status ‘Under Approval’).
- [3] EN 50065-1:2011, Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz - Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances.
- [4] Matanza J., Alexandres S., Rodriguez-Morcillo C., Difference sets-based compressive sensing as denoising method for narrow-band power line communications, *IET Communications* Vol. 7 ( 15 ), 2013, pp. 1580-1586.
- [5] Dubalski B., Kiedrowski P., Petersen J. M., An Analysis of the Applicability of "Hot-Potato" Routing in Wireless Sensor Networks Used in Energy Consumption Monitoring Systems, *Zeszyty Naukowe UTP - Seria: Elektrotechnika*, nr 15 (257), 2010, pp. 5-24.
- [6] Busch C., Herlihy M., Wattenhofer R., Routing without Flow Control, *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures*, Hersonissos, Greece, 2001, pp. 11-20.
- [7] Baran P., On Distributed Communications Networks, *IEEE Trans. Commun. Syst.* vol. CS-12, 1964, pp. 1-9.
- [8] Kiedrowski P., *Image Processing & Communications Challenges* (ed. R. S. Choraś & Antoni Zabłudowski), Easy Applicable Algorithm for Accelerate Reading Process in AMR Systems based on WSN Solutions, *Academy Publishing House EXIT*, 2009, pp. 482-487.
- [9] Graham R.L., Knuth D.E., Patashnik O., *Concrete Mathematics*, Addison-Wesley Comp. Inc. 1994.
- [10] Korzan B., *Elementy teorii grafów i sieci - Metody i zastosowania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [11] Al-Karaki A.N., Kamal A.E., *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey*, *IEEE Wireless Comm.*, pp. 6-28, 2004.
- [12] Głąbowski M., Musznicki B., Nowak P., Zwierzykowski P., *Image Processing and Communications Challenges 5*, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, An Algorithm for Finding Shortest Path Tree Using Ant Colony Optimization Metaheuristic, *Publisher: Springer International Publishing*, pp. 317-326, 2014.
- [13] Jędrzychowski R., *Kontrola pracy małych źródeł energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia*, *Rynek Energii*, No 1 (104) pp.16-20, 2013.

**APPLICATION OF HOT-POTATO PROTOCOL IN ROAD LIGHTING  
CONTROL – TRAFFIC ANALYSIS BASED ON GRAPH THEORY**

The paper presents a method for calculating the communication time between road lighting nodes and the data acquisition and distribution node in telemetric networks designed for road lighting control. The presented method is adequate for all types of networks in which to enlarge the range a multi-hop technique is used. The study considered two transmission technologies: wireless in ISM band and wired PLC, which uses the same wires both for power supplying as well as data transmission. The usage of hot-potato routing protocol is a consequence of the specific topology which is created by road lighting infrastructure. In the case of such a network topology, as well as taking into account the number of nodes supported by a single sink protocol hot-potato is still effective at keeping its main advantages, which are small requirements in terms of computing resources and RAM and ROM.