

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł   E L E K T R Y C Z N Y



Instytut Elektrotechniki Teoretycznej  
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych  
Zakład Elektrotechniki Teoretycznej  
i Informatyki Stosowanej

# Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Informatyka  
w specjalności Inżynieria oprogramowania

Problemy współbieżności w algorytmach węzła sieci  
czujnikowej na przykładzie modelu w języku Go.

**Jakub Młynarczyk**

nr albumu 288226

promotor  
dr inż. Łukasz Makowski

WARSZAWA 2019

# **Problem współbieżności w algorytmach węzła sieci czujnikowej na przykładzie modelu w języku Go.**

## **Streszczenie**

Praca składa się z krótkiego wstępu jasno i wyczerpująco opisującego oraz uzasadniającego cel pracy, dwóch rozdziałów (2-3) zawierających opis istniejących technologii, dostępnych rozwiązań oraz opisuje autorski system środowiska symulacyjnego. Rozdział trzeci przedstawia szczegóły implementacji środowiska symulacyjnego. Ostatni rozdział pracy to opis możliwości dalszego rozwoju projektu.

**Słowa kluczowe:** wsn, sieci czujnikowe, golang

## **Challenges of concurrency in wireless sensor network, based on a model developed in Go.**

## **Abstract**

This thesis presents a novel way of using a novel algorithm to present complex problems of concurrency in wireless sensor networks. In the first chapter presents the fundamentals of wireless sensor networks and technologies, currently available solutions, as well as authored new design proposal. The second chapter presents the authored simulation tool. In the third chapter presents the implementation of the simulation environment in Go programming language. The fourth chapter contains results of tests which compare existing wireless sensor network protocols and proves simulator correctness. Finally some possibilities of further development of the invented algorithms are proposed.

**Keywords:** wsn, wireless sensor networks, golang

WARSZAWA, 31 marca 2019

POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

### OŚWIADCZENIE

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa magisterska pt. Problemy współbieżności w algorytmach węzła sieci czujnikowej na przykładzie modelu w języku Go.:

- została napisana przeze mnie samodzielnie,
- nie narusza niczyich praw autorskich,
- nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam, że przedłożona do obrony praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą postępowania związanego z uzyskaniem dyplomu lub tytułu zawodowego w uczelni wyższej. Jestem świadom, że praca zawiera również rezultaty stanowiące własności intelektualne Politechniki Warszawskiej, które nie mogą być udostępniane innym osobom i instytucjom bez zgody Władz Wydziału Elektrycznego.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Jakub Młynarczyk.....



# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>1</b>
1.1	Cel pracy . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Wykorzystane technologie</b>	<b>2</b>
2.1	Język programowania Go . . . . .	2
2.2	Serializacja danych Protocol Buffers . . . . .	5
2.3	Narzędzia dodatkowe . . . . .	6
2.3.1	System kontroli wersji git . . . . .	6
2.3.2	GNUPlot . . . . .	6
2.3.3	Docker . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Bezprzewodowe sieci czujnikowe</b>	<b>7</b>
3.1	Wstęp do bezprzewodowych sieci sensorowych . . . . .	7
3.2	Model transmisji . . . . .	8
3.3	Protokoły . . . . .	8
3.3.1	Komunikacja bezpośrednia . . . . .	9
3.3.2	LEACH . . . . .	10
3.3.3	PEGASIS . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Architektura systemu</b>	<b>14</b>
4.1	Komponenty systemu . . . . .	14
4.1.1	Plik konfiguracyjny . . . . .	15
4.1.2	Moduł główny (Core) . . . . .	19
4.1.3	Moduł symulatora (Simulator) . . . . .	24
4.2	Obsługa systemu . . . . .	25
4.2.1	Konfiguracja środowiska i kompilacja . . . . .	25
4.2.2	Generowanie konfiguracji . . . . .	26
4.2.3	Uruchamianie scenariuszy . . . . .	28
4.2.4	Generowanie wykresów . . . . .	28
4.2.5	Dodawanie nowych protokołów . . . . .	29

<b>5</b>	<b>Opracowanie wyników eksperymentów</b>	<b>30</b>
5.1	Dane wejściowe . . . . .	30
5.2	Scenariusze . . . . .	31
5.2.1	Test 1 - Wielkość wiadomości . . . . .	31
5.2.2	Test 2 - Ilość węzłów w sieci . . . . .	40
5.2.3	Test 3 - Wielkość obszaru sieci . . . . .	51
5.2.4	Test 4 - Parametr 'p' . . . . .	61
5.3	Podsumowanie wyników . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>76</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>77</b>

## Podziękowania

Dziękuję bardzo serdecznie wszystkim pracownikom uczelni, rodzinie oraz pracodawcy za poświęcony czas i energię.

Jakub Młynarczyk





# Rozdział 1

## Wstęp

W ciąg ostatnich lat obserwujemy szybki rozwój technologii informatycznych i teleinformatycznych w zakresie bezprzewodowych sieci czujnikowych. Pierwsze implementacje bezprzewodowych czujników wykorzystano w celach zbrojeniowych. Aktualnie, możliwości oferowane przez bezprzewodowe czujniki znajdują zastosowanie w nieskończonej liczbie aplikacji, zarówno w przemyśle (np. medycynie), jak również w sektorze prywatnym (np. inteligentny dom).

### 1.1 Cel pracy

Celem pracy są badania problemów współbieżności w algorytmach sieci czujnikowej. Praca wykorzystuje ogólnie znane i udokumentowane algorytmy umożliwiające transmitowanie danych w sieci, w których najważniejszym ograniczeniem jest skończona ilość energii czujnika.

Istotnym elementem pracy jest autorski symulator sieci sensorowej, która stanowi podstawowe narzędzie umożliwiające implementację oraz testowanie nowych algorytmów. Aplikacja umożliwia tworzenie symulacji porównujących efekty zastosowania różnych algorytmów transmisji danych, bez potrzeby wykorzystania fizycznych urządzeń.

# Rozdział 2

## Wykorzystane technologie

Rozdział ten zawiera opis technologii oraz narzędzi wykorzystanych w pracy dyplomowej. Przedstawiony zostanie język oprogramowania Go, w którym napisanym zostały najważniejsze komponenty pracy dyplomowej. Rozdział zawiera również metody i technologie niezbędne do wygenerowania danych wejściowych, technik serializacji danych oraz ich reprezentacji przy wykorzystaniu Protocol Buffers, GNUPlot, itd.

### 2.1 Język programowania Go

Go (Golang) to język programistyczny stworzony jako wolne oprogramowanie (open source) na potrzeby firmy Google, Inc. Głównymi architektami języka są Robert Griesemer, Rob Pike i Ken Thompson. Golang umożliwia tworzenie komercyjnego oprogramowania i jest wspierany na wielu systemach operacyjnych (Linux, Windows, Mac OS X).

Język Go należy do kategorii języków kompilowanych, z statycznym definiowaniem typu zmiennych. Poniżej przedstawiony został fragment kodu źródłowego napisane w języku Go.

---

```
package main

import (
    "fmt"

    "github.com/golang/example/stringutil"
)

type Label struct {
```

```

    Text string
    X, Y int
}

func (l *Label) ReverseText() {
    l.Text = stringutil.Reverse(l.Text)
}

func main() {
    var x = 100
    fmt.Printf("<%T>: %v", x, x)
    // Expected output: <int>: 100
    hello := Label{
        Text: "Hello",
        X:    100,
        Y:    200,
    }

    fmt.Println(hello.Text)
    // Expected output: hello
    hello.ReverseText()
    fmt.Println(hello.Text)
    // Expected output: olleh
}

```

---

W powyższym przykładzie przedstawione zostało kilka innowacyjnych funkcjonalności języka Go. Składnia języka oraz funkcjonalności zbliżone są do C/C++ czy Python, jednakże występuje kilka cech unikatowych dla Go.

## Porównanie Go z Python

- Go jest językiem wspomagającym tworzenie aplikacji wielowątkowych.
- Go jest językiem statycznym, co pozwala wyeliminować błędy typu runtime wynikające z typu zmiennej.
- Go jest językiem samodokumentującym. Określony odgórnie format komentarzy umożliwia automatyczne tworzenie przejrzystej dokumentacji.
- Go jest językiem kompilowanym, co pozwala na szybsze uruchamianie i egzekucję oprogramowania.
- Go wykorzystuje mniej pamięci. Przykład: W Go zmienna typu int32 wymaga 4 bajty pamięci, w Python 24 bajty.

- Python umożliwia runtime reflection.
- Python posiada większą bazę publicznych bibliotek.

## Porównanie Go z C++

- Go posiada system zarządzania pamięcią (garbage collector).
- Go jest językiem wspomagającym tworzenie aplikacji wielowątkowych.
- Go jest językiem samodokumentującym. Nie wymaga tworzenia plików typu header.
- Go nie jest językiem obiektowym. Zdolność dziedziczenia (inheritance) została zastąpiona osadzaniem (embedding).
- Go posiada możliwość użycia (zaimportowania) dowolnej biblioteki C, C++.
- C++ posiada osiągnąć szybszą egzekucję oprogramowania.
- C++ posiada tworzenie kodu niezależnie od typu zmiennej (generics).
- C++ nie posiada systemu zarządzania pamięcią (garbage collector), co umożliwia większą kontrolę nad zasobami pamięci (np. w mikrokontrolerach).

## Unikatowe cechy Go

- Produktem kompilacji jest plik egzekucyjny posiadający wszystkie niezbędne zależności.
- Zarządzanie pakietami pozwala na importowanie rozwiązań bezpośrednio z GitHub (lub innych serwisów zewnętrznych).
- Dynamiczna alokacja typu zmiennej statycznej.
- Natywnie wspieranie tworzenia oprogramowania wykorzystującego wielowątkowość i współbieżność procesów.
- Natywna metoda testowania funkcjonalności i bibliotek.
- Pełny zestaw wbudowanych narzędzi pozwalających na testowanie wydajności kodu (benchmarking), formatowania składni kodu zgodnie ze standardem (gofmt), oraz wiele innych funkcjonalności.

## 2.2 Serializacja danych Protocol Buffers

Protocol Buffers (proto, protobuf) to mechanizm serializacji danych stworzony na potrzeby firmy Google, Inc. Protocol Buffers to mechanizm współpracującym niezależnie od języka oprogramowania aplikacji czy platformy na którym uruchamiana jest aplikacja. Technologia ta definiuje strukturę danych (proto schema) za pomocą dedykowanego języka, składającego się z prostych zmiennych (np.: int64, string) oraz złożonych komunikatów (message). Poniżej przedstawiona została przykładowa struktura.

---

```
// example.proto
syntax = "proto3";

// Citizen represents a single citizen of Poland.
message Citizen {
    // The name of a citizen.
    string name = 1;
    // The surname of a citizen.
    string surname = 2;
    // (required) Unique Polish national identification number.
    PESEL pesel = 3;
}

// PESEL represents Polish Universal Electronic System for
// Registration of the Population.
message PESEL {
    // (required) Unique Polish national identification number.
    uint64 number = 1;
    bool active = 2;
}
```

---

Struktura ta przechowywana jest w plikach o rozszerzeniu ‘.proto’, które są następnie kompilowane do dowolnego z wspieranych języków oprogramowania (w przypadku Protocol Buffers w wersji 3, wspierana jest generacja kodu w Java, C++, Python, Java Lite, Ruby, JavaScript, Objective-C, C# oraz PHP). Następnie, zserializowane dane zostają zapisane w formacie binarnym (wire format), który umożliwia na uzyskanie wyższego poziomu kompresji danych oraz transmisję danych bez potrzeby wykonania dalszego kodowania. Wynikiem kompilacji plików ‘.proto’ jest zestaw bibliotek zawierający wygenerowany kod źródłowy, wraz z gotowymi strukturami, funkcjami i metodami niezbędnymi do operowania danymi w sposób natywny dla wybranego

języka programowania.

## 2.3 Narzędzia dodatkowe

Sekcja ta przedstawia zestaw narzędzi których funkcjonalności umożliwiły stworzenie oraz ułatwiły zarządzanie oprogramowaniem stworzonym w celach pracy dyplomowej.

### 2.3.1 System kontroli wersji git

Git to rozproszony system kontroli wersji stworzony jako wolne oprogramowanie (open source). Głównym architektem narzędzia jest Linus Torvalds. Git to oprogramowanie powszechnie stosowanym w przypadku zarządzania oprogramowaniem. Narzędzie to umożliwia tworzenie pobocznych gałęzi (branch) niezależnych od głównej gałęzi. Funkcjonalność ta pozwala na niezależne wprowadzanie zmian w kodzie na określonej wersji kontroli, które mogą następnie zostać wprowadzon ponownie do gałęzi głównej (merge). Architektura rozproszna git (w przeciwieństwie do zcentralizowanych systemów kontroli wersji) umożliwia programistom na posiadanie lokalnej kopii repozytorium, której zmiany mogą zostać następnie wprowadzone do gałęzi głównej.

### 2.3.2 GNUPlot

GNUPlot to narzędzie do generowania wykresów funkcji w oparciu o dane wejściowe. Program dostępny jest niemal na każdym systemie operacyjnym. Przy pomocy GNUPlot generować można dwu- oraz trzywymiarowe wykresy, które zapisane mogą zostać w różnych formatach t.j. PNG, SVG czy JPEG.

### 2.3.3 Docker

Docker to narzędzie stworzone jako wolne oprogramowanie (open source) napisane w języku Go przez firmę Docker, Inc. Narzędzie to pozwala na tworzenie kontenerów, które izolują aplikację na poziomie systemu operacyjnego. W przeciwieństwie do maszyn wirtualnych, kontener nie wymaga wirtualizowania systemu operacyjnego dla każdego z kontenerów. Wszystkie równoległe działające kontenery aplikacji działające na pojedynczym urządzeniu współdzielą parametry fizyczne maszyny oraz jądro systemu operacyjnego (np. Linux). Izolacja kontenerów widoczna jest na poziomie zależności (dependency) do określonych wersji bibliotek (libraries), narzędzi (binaries), plików konfiguracyjnych czy parametrów.

## Rozdział 3

# Bezprzewodowe sieci czujnikowe

W tym rozdziale przedstawiona zostanie najważniejsza część teoretyczna bezprzewodowych sieci sensorych, która jest niezbędna w celu zrozumienia problemu rozwiązywanego w pracy dyplomowej.

### 3.1 Wstęp do bezprzewodowych sieci sensorowych

Bezprzewodowe sieci sensorowe (wireless sensor network) nazywa się również bezprzewodowymi sieciami czujników. Sieć czujnikowa składa się z urządzeń, których funkcją jest realizowanie określonego zadania. Pierwsze aplikacje i zastosowania bezprzewodowych sieci czujników zostały wdrożone na potrzeby wojskowe, jednakże przeciągu ostatnich lat, technologie te znalazły wiele nowych zastosowań w przemyśle (np. pomiary meteorologiczne) i aplikacjach codziennych (np. systemy domów inteligentnych).

Rozwój technologii, malejący koszt elektroniki oraz dostępność produktów bezprzewodowej sieci czujnikowej, umożliwia tworzenie dedykowanych aplikacji. Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń oraz rozwiązań, a proces wyboru uzależniony jest przede wszystkim od wymogów projektu oraz budżetu. Dla uproszczenia przyjąć można, że pojedynczy czujnik powinien składać się z procesora zdolnego wykonywać określone zadanie, pamięci zdolnej do przechowywania informacji oraz anteny, która umożliwia nadawanie i odbieranie informacji.

Proces wymiany informacji między urządzeniami zależy od protokołów i implementacji. Niezależnie jednak od protokołu i implementacji, cel pozostaje niezmienny. Informacje posiadane przez węzeł w sieci (np. pomiar temperatury otoczenia) muszą zostać przekazane z węzła pomiarowego do węzła głównego. Węzeł główny, zwany również ‘sink’ jest odpowiedzialnym

za agregację wszystkich informacji oraz ich dalsze przetwarzanie. W dalszej części pracy, przedstawione zostaną dwa protokoły trasowania (routingu), których zadaniem jest zoptymalizowanie energetyczne procesu komunikacji, podwyższenie niezawodności systemu oraz umożliwienie zautomatyzowanej organizacji topologii sieci. By móc zrozumieć istotę i korzyści wykorzystania protokołów trasowania, niezbędnym jest przedstawienie najprostrzego schematu komunikacji, komunikacji bezpośredniej.

## 3.2 Model transmisji

W pracy wykorzystany został model transmisji przedstawiony w pracy Model jest powszechnie wykorzystywany w planowaniu oraz symulowaniu aplikacji bezprzewodowych sieci czujników. Model przedstawia zależności transmisji danych w wolnej przestrzeni pomiędzy dwoma węzłami (nadawcą i odbiorcą) uwzględniając wielotorowość sygnału. Poniższy wzór pozwala na wyznaczenie całkowitego kosztu transmisji  $k$ -bitów do węzła oddalonego o  $d$ -metrów:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}(k) + E_{TX-amp}(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times \varepsilon_{fs} \times d^2 & d < d_{d_0} \\ k \times E_{elec} + k \times \varepsilon_{fs} \times d^4 & d \geq d_{d_0} \end{cases}$$

gdzie  $E_{elec}$  jest energią wykorzystywaną przez nadajnik (np. praca mikroprocesora),  $d_0$  wyznaczamy przez  $\sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}}$ . W zależności od odległości na której odbywa się komunikacja,  $\varepsilon_{fs}$  reprezentuje transmisję w wolnej przestrzeni, natomiast  $\varepsilon_{mp}$  wielotorowość transmisji.

Poniższy wzór pozwala na wyznaczenie całkowitego kosztu odbioru  $k$ -bitów przez węzeł:

$$E_{RX}(k, d) = E_{RX}(k) = k \times E_{elec}$$

## 3.3 Protokoły

Warstwa sieciowa w bezprzewodowych sieciach czujników jest elementem krytycznym działania całości systemu. Warstwa ta w przeciwieństwie do warstwy fizycznej, odpowiedzialna jest za logiczne skonfigurowanie węzłów i zaimplementowanie algorytmu trasowania danych pomiędzy węzłami.

Istnieje wiele protokołów WSN, których dobór zależy od przede wszystkim od naszej aplikacji oraz parametrów sieci które wymagają zoptymalizacji.



Poniżej przedstawione zostały cztery aspekty, których dokładne określenie pozwoli na dopasowanie najbardziej optymalnego algorytmu:

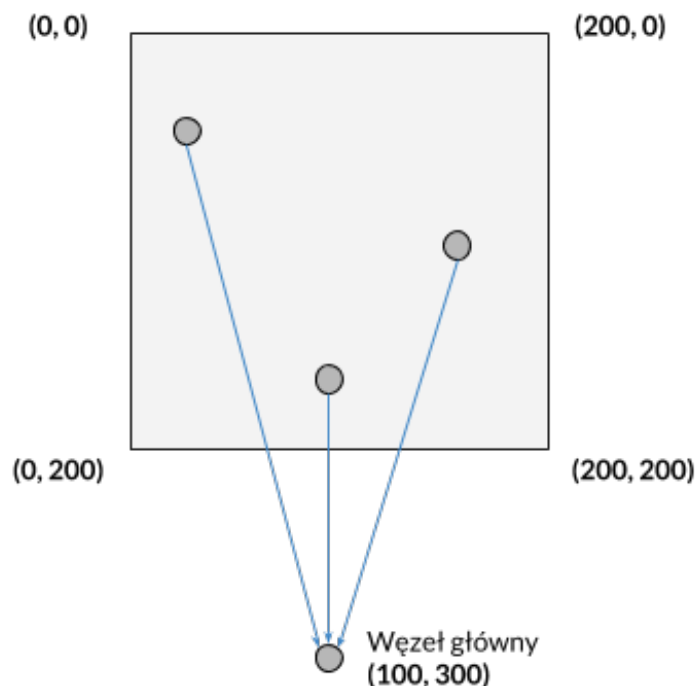
- koszty energetyczne - w sieci w której ilość energii węzła jest ograniczona, zalecany jest stosowanie algorytmów pozwalających na efektywną wymianę danych.
- adresowania i rozpoznawania węzłów - w sieci w której występuje duża ilość węzłów, należy określić metodę adresacji. Metoda statyczna (np. wykorzystanie pliku konfiguracyjnego) lub dynamiczna (np. wygenerowanie unikatowego numeru identyfikującego).
- skalowalności sieci - w sieci w której występuje duża ilość węzłów wymiana informacji może być utrudniona zarówno pod kątem fizycznym (np. brak dostępnej przepustowości w paśmie bezprzewodowym), jak i logicznym (np. długi czas detekcji węzłów i budowania topologii sieci).
- niezawodności wymiany danych - w sieci w której dane generowane przez poszczególne węzły nie mogą zostać utracone, zalecane jest wykorzystanie algorytmu umożliwiającego detekcję brakujących fragmentów danych i retransmisję.

W następnej części pracy przedstawione zostaną 3 protokoły trasowania danych, które zostały zaimplementowane w symulatorze. Wybór ukierunkowany był na ograniczenie kosztów energetycznych w sieci, które umożliwia na wydłużenie czasu życia każdego z węzłów.

### 3.3.1 Komunikacja bezpośrednia

Komunikacja bezpośrednia jest rozwiązaniem najprostrzym z perspektywy implementacji, jednakże nieefektywnym z poziomu energetycznego. Węzły znajdujące się w sieci nie są zaangażowane w podejmowanie decyzji dotyczących optymalizacji kosztów transmisji. Adres węzła głównego (sink) może być zaprogramowany na poziomie pliku konfiguracyjnego. Dane wysyłane przez węzeł nadawane są bezpośrednio do węzła głównego. Model środowiska symulacyjnego definiuje koszt transmisji komunikacji. Wartość ta zależy od odległości między dwoma węzłami. Czas życia węzłów (posiadających identyczną ilość energii początkowej oraz wielkość przesyłanych informacji) wydłuża się, wraz z malejącym dystansem do węzła głównego.

Poniższa ilustracja przedstawia trzy węzły w sieci, które komunikują się bezpośrednio z węzłem głównym:



### 3.3.2 LEACH

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) jest algorytmem wykorzystywanych w protokołach routingu bezprzewodowej sieci czujnikowej. W przeciwieństwie do komunikacji bezpośredniej, LEACH jest protokołem w którym występuje hierarchia.

Zestaw operacji w protokole LEACH nazywa się rundami (round). Każda z rund podzielona jest na dwie fazy. W pierwszej fazie, fazie konfiguracyjnej (setup), węzły dokonują podziału sieci na niezależne klastry (cluster). W drugiej fazie, fazie komunikacyjnej (steady state), węzły uczestniczące w sieci dokonują wymiany informacji za pomocą agregacji danych w klustrze, które następnie przesłane są do stacji bazowej.

Faza konfiguracji (setup) zbudowana jest z trzech etapów. W pierwszym etapie węzły dokonują wyboru roli w rundzie. W LEACH występują dwa rodzaje węzłów:

- węzły typu cluster head (CH)
- węzły standardowe (non-CH)

Każdy z węzłów generuje losową wartość 'n' z zakresu  $[0, 1]$ . Wartość ta podstawiona w poniższe równanie:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P[r*mod(1/P)]} & \text{jeżeli } n \in G \\ 0 & \text{w innym przypadku} \end{cases}$$

gdzie  $P$  oznacza wartość z zakresu  $(0, 1]$  definiująca prawdopodobieństwa wyznaczenia węzła typu cluster head.  $G$  jest zbiorem węzłów które nie pełniły roli cluster head w ostatnich  $1/P$  rundach.

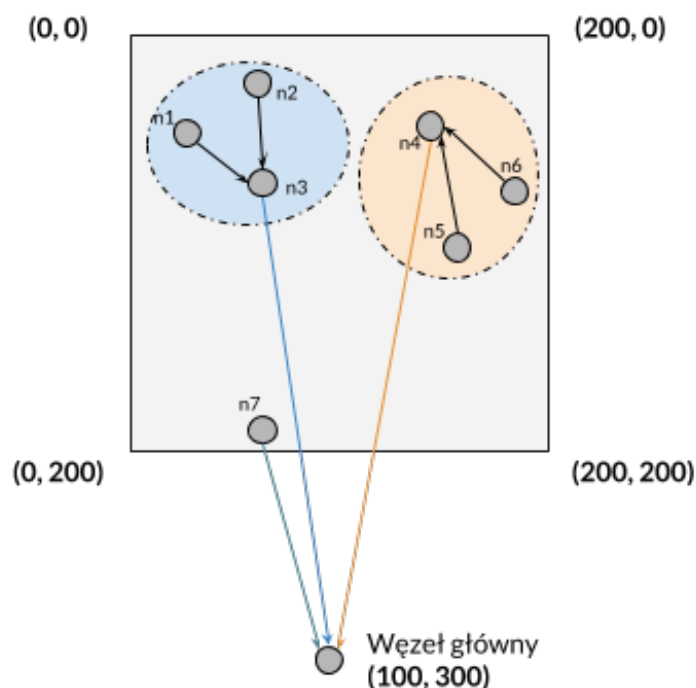
W momencie ustalenia roli przez węzły, każdy z węzłów informuje pozostałe węzły uczestniczące w sieci o swojej roli w rundzie.

Kolejnym etapem fazy konfiguracji jest wyznaczenie klustra do którego zostaną przyłączone węzły standardowe. Każdy z węzłów standardowych wybiera jeden węzeł typu cluster head. W przypadku otrzymania informacji od kilku węzłów typu cluster head, węzeł standardowy wybiera węzeł CH znajdujący się najbliższej (węzeł którego sygnał jest najmocniejszy).

Ostatnim etapem jest ukończenie formowania klusterów w którym znajduje się dokładnie jeden węzeł typu cluster head. Wystąpić może sytuacja w której węzeł typu cluster head nie posiada przynależących węzłów standardowych. Pozytywnie zakończona faza formowania klastrów tworzy stabilną sieci wymiany informacji.

W tym momencie rozpoczyna się faza komunikacji (steady state) w której węzły standardowe dokonują transmisji danych do węzła typu cluster head. Węzły CH dokonują agregacji zebranych informacji oraz bezpośrednio przekazanie ich do węzła głównego (sink). Stworzenie środowiska w którym węzły dokonują pośredniczenia informacji, pozwala na ograniczenie kosztów energetycznych transmisji danych przez standardowe węzły (dystans do węzła typu cluster head jest mniejszy niż do sink). Należy jednak pamiętać, że koszt energetyczny transmisji węzłów typu cluster head rośnie, gdyż stają się one odpowiedzialne za odbieranie informacji, przetworzenie ich, a następnie wysłanie do całości do sink. Wielkość informacji (mierzona w bajtach), przetransmitowana z węzłów typu cluster head jest zależna od ilości standardowych węzłów przynależących do CH oraz metody agregacji informacji.

Poniższa ilustracja przedstawia zestaw węzłów w sieci, które wykorzystują protokół LEACH:



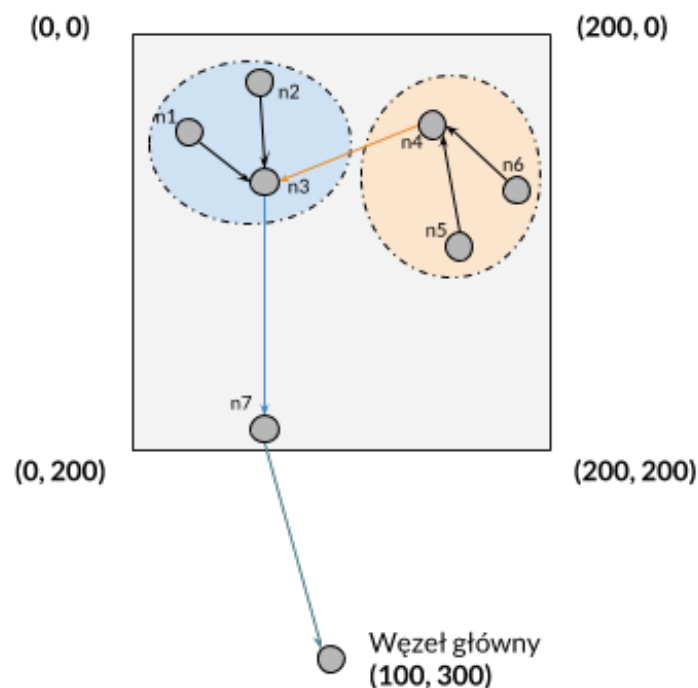
### 3.3.3 PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient GAathering in Sensor Information Systems) jest algorytmem wykorzystywanym w protokołach routingu bezprzewodowej sieci czujnikowej. W przeciwieństwie do komunikacji bezpośredniej, PEGASIS podobnie jak LEACH jest protokołem w którym występuje hierarchia.

PEGASIS jest protokołem dokonującym usprawnień w protokole LEACH. W przypadku sieci czujnikowej, urządzenia pełniące rolę węzłów posiadają ograniczone ilości energii, wynikające np. z zasilania bateryjnego. Przebudowana metoda przekazywania danych zebranych przez węzły typu cluster head, pozwala na ukończenie rundy przy wykorzystaniu mniejszej ilości energii niż LEACH.

Pierwsza faza, faza komunikacji, w której ustalane są role węzłów jest identyczna. Przebudowana została metoda transmisji zagregowanych informacji od węzłów typu cluster head to węzła głównego (sink). Węzły typu cluster head formują łańcuch, w którym najdalej oddalony węzeł typu cluster head, przekazuje zebrane i zaagregowane dane do innego węzła typu cluster head znajdującego się w najbliższym sąsiedztwie. Algorytm trasowania najmniejszym kosztem nazywana się typu 'greedy'.

Efektem niekorzystnym w protokole PEGASIS jest wydłużenie czasu każdej z rund, wynikające z sekwencyjnej wymiany danych w łańcuchu. Generowane w ten sposób są dodatkowe koszty energetyczne związane z utrzymaniem węzłów w stanie pracy, kosztem odbioru i przetworzenia informacji. Należy jednak podkreślić, że zysk energetyczny wynikający z transmisji danych na krótsze dystanse kompensuje poniesione straty, tym samym pozwalając na wydłużenie czasu pracy każdego z węzłów.



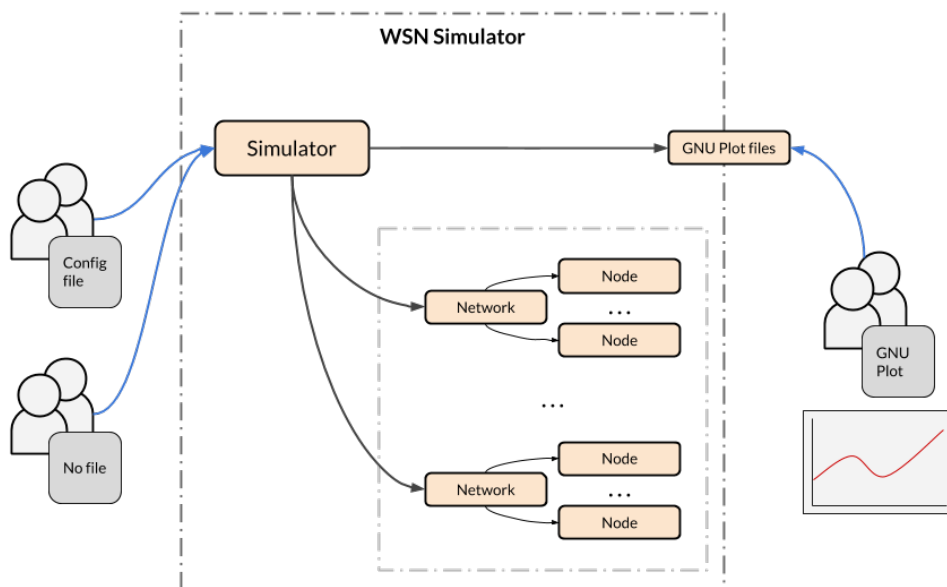
# Rozdział 4

## Architektura systemu

System informatyczny stworzony na potrzeby pracy dyplomowej ma za zadanie dostarczenie wyników oraz wykresów niezbędnych do zbadania poniższych zależności sprawności energetycznej węzłów dla wybranych algorytmów w sieci WSN (komunikacji bezpośredniej, LEACH, PEGASIS).

### 4.1 Komponenty systemu

Poniższy diagram przedstawia dekompozycję modułów, całkowitą architekturę systemu oraz kierunki interakcji i przepływu informacji.



Użytkownik (znajdujący się po lewej stronie) posiada możliwość uruchomienia oprogramowania na dwa sposoby:

- symulacja prekonfigurowana za pomocą pliku konfiguracyjnego
- symulacja bez pliku konfiguracyjnego

Opcja symulacji bez pliku konfiguracyjnego powoduje wygenerowanie pliku konfiguracyjnego w którym znajduje się 200 węzłów, rozproszonych w sposób pseudolosowy na przestrzeni 200 x 200.

Symulator tworzy wewnętrzną strukturę sieci i węzłów, które poddawane są symulacji. Wynik końcowy poszczególnych sieci zwracany jest do symulatora, który generuje pliki w formacie kompatybilnym z narzędziem GNU Plot.

#### 4.1.1 Plik konfiguracyjny

Plik konfiguracyjny (config file) posiada dane wejściowe pozwalające na zbudowanie środowiska testowego. Informacje zawarte w pliku konfiguracyjnym można podzielić na dwie sekcje:

- konfiguracja symulatora i sieci
- konfiguracja węzła

##### Konfiguracja symulatora i sieci

Konfiguracja symulatora i sieci składa się z pięciu zmiennych w komunikacie Config. Każda z tych wartości może być modyfikowana bez potrzeby ponownej kompilacji oprogramowania symulacyjnego. Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych parametrów konfiguracyjnych:

- protokół (protocol) - zmienna ta zdefiniowana za pomocą komunikatu typu enum `E_Protocol` pozwala symulatorowi wybrać odpowiedni protokół sterujący symulacją. Dokładny opis działania protokołów zostanie przedstawiony w dalszej części pracy.
- wartości maksymalnej rund pomiarowych (`max_rounds`) - zmienna ta pozwala określić wartość rund pomiarowych aktywnych węzłów w pojedynczej symulacji, po której całkowity przebieg symulacji zostanie zatrzymany. Wyznaczenie tej wartości umożliwia użytkownikowi określenie dowolnej granicy, bez potrzeby oczekiwania na zakończenie symulacji (wykorzystanie całkowitej energii dostępnej przez węzły pomiarowe).

- proporcji węzłów typu kluster do wszystkich węzłów (`p_cluster_heads`) - zmienna ta pozwala określić stosunek ilości węzłów pomiarowych odpowiedzialnych za pośredniczenie w przesyłaniu danych pomiarowych (klastrów) do ilości wszystkich węzłów w sieci. Parametr ten wykorzystywany jest zależnie od protokołu.
- długość wiadomości (`msg_length`) - zmienna ta określa całkowity rozmiar wiadomości generowanych przez pojedynczy węzeł pomiarowy. Długość wyrażona jest w bajtach i jest sumą dwóch elementów, danych pomiarowych oraz dodatkowych danych generowanych w procesie enkapsulacji (np. adresowanie, preambuły, itd.)
- konfiguracja węzłów (`nodes`) - zmienna ta zdefiniowana za pomocą listy komunikatów typu `Node`. Symulacja musi składać się przynajmniej z dwóch węzłów. Kolejność listy ma znaczenie, gdyż pierwszy węzeł pełni rolę głównego odbiornika danych (`sink`). Dokładniejszy opis parametrów poszczególnych węzłów przedstawiony został w kolejnym porozdziale ‘Konfiguracja węzła’.

Poniżej przedstawiony został fragment pliku konfiguracyjnego dla konfiguracji symulatora i sieci:

---

```
enum E_Protocol {
    UNSET = 0;
    DIRECT = 1;
    LEACH = 2;
    APTEEN = 3;
    PEGASIS = 4;
}

message Config {
    // Simulation protocol.
    E_Protocol protocol = 1;
    // Number of maximum rounds in simulation.
    int64 max_rounds = 2;
    // Percentage of cluster heads among all nodes [0, 1].
    double p_cluster_heads = 3;
    // Size of data sent by individual node (in Bytes).
    int64 msg_length = 4;
    // Nodes points to configuration for each node.
    repeated Node nodes = 5;
}
```

---



## Konfiguracja węzła

Konfiguracja węzła składa się z pięciu zmiennych w komunikacie Node. Każda z tych wartości może być modyfikowana bez potrzeby ponownej kompilacji oprogramowania symulacyjnego. Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych parametrów konfiguracyjnych:

- indeks (id) - zmienna ta określa unikatowy identyfikator węzła. Parametr ten umożliwia identyfikację węzła podczas symulacji.
- energia początkowa (initial\_energy) - zmienna ta określa ilość energii (mierzonej w [J]), którą posiada węzeł w momencie rozpoczęcia symulacji. W przypadku zdefiniowania zerowej energii początkowej, węzeł nie będzie brał udziału w komunikacji ze względu na brak zasobów energetycznych na przeprowadzenia jakiegokolwiek operacji.
- pozycja (location) - zmienna ta zdefiniowana za pomocą komunikatu typu Location pozwala symulatorowi na umieszczenie węzła w dwuwymiarowej przestrzeni. Pozycja węzła wykorzystywana jest do określania odległości między węzłami i aplikowania kosztów energetycznych operacji (np. transmisji danych).
- koszt energetyczny (energy\_cost) - zmienna ta zdefiniowana za pomocą komunikatu typu EnergyCost pozwala na wprowadzenie dodatkowych kosztów energetycznych operacji dla poszczególnych węzłów. Podstawowy model transmisji posiada zdefiniowane koszty energetyczne operacji. W przypadku zdefiniowania zmiennej EnergyCost dla węzła, koszt operacji (np. transmisji, odbioru, pomiaru i przetwarzania danych) ulega zmianie.
- opóźnienia czasowe (time\_delay) - zmienna ta zdefiniowana za pomocą komunikatu typu TimeDelay pozwala symulatorowi na wprowadzenie dodatkowych parametrów czasowych dla operacji wykonywanych przez węzeł. Iloczyn zmiennej (np. czasu przetwarzania danych węzła [ns]) i kosztu energetycznego działania węzła [J/s] reprezentuje dodatkowe parametry symulacji, które umożliwiają tworzenie zaawansowanych i precyzyjnych scenariuszy.

Poniżej przedstawiony został fragment pliku konfiguracyjnego dla konfiguracji węzła:

---

```
// Node defines a configuration for a single node.
message Node {
    // Unique ID for a node.
```

```

int64 id = 1;
// Initial value of energy (in Joules).
double initial_energy = 2;

// Location of a node in 2D space.
Location location = 3;
// Energy consumption of node operations.
EnergyCost energy_cost = 4;
// Time delays introduced by node operations
TimeDelay time_delay = 5;
}

```

---

Poniżej przedstawiony został fragment pliku konfiguracyjnego dla konfiguracji lokalizacji węzła:

```

// Location defines a X, Y coordinates of a node.
message Location {
    double X = 1;
    double Y = 2;
}

```

---

Poniżej przedstawiony został fragment pliku konfiguracyjnego dla konfiguracji kosztów energetycznych pracy węzła:

```

// EnergyCost defines energy consumption for common node operations.
message EnergyCost {
    // Energy required to transmit one byte (in Joules).
    double transmit = 1;
    // Energy required to receive one byte (in Joules).
    double receive = 2;
    // Energy required to listen the channel for a second (in Joules).
    double listen = 3;
    // Energy required to process sensor data (in Joules).
    double sensor_data_process = 4;
    // Energy required to wake up MCU (in Joules).
    double wake_up_mcu = 5;
}

```

---

Poniżej przedstawiony został fragment pliku konfiguracyjnego dla konfiguracji opóźnień czasowych pracy węzła:

```
// TimeDelay defines time delays for common node operations.
message TimeDelay {
    // Time required to process sensor data (in nanoseconds).
    int64 sensor_data_process = 1;
    // Time required to wake up MCU (in nanoseconds).
    int64 wake_up_mcu = 2;
}
```

---

### 4.1.2 Moduł główny (Core)

Moduł główny posiada najważniejsze cechy i funkcjonalności umożliwiające modelowanie systemu symulatora WSN. Wszystkie zaimplementowane struktury (structs) znajdują się w jednej bibliotece (package) o nazwie ‘core’.

#### Węzeł (Node)

Węzeł (Node) reprezentuje model węzła, będącego elementem podstawowym w sieci. Struktura ta przechowuje dane konfiguracyjne węzła, poziom energii czy dane historyczne, pozwalające na monitorowanie pracy oraz tworzenie grafów.

Poniżej przedstawiona została struktura węzła oraz definicje funkcji przynależące do struktury.

---

```
type Node struct {
    Conf    config.Node
    Ready   bool
    nextHop *Node // As a default set to Base Station.
    Energy  float64 // Energy level of a node.

    transmitQueue int64
    receiveQueue  int64
    // Statistics and aggregation variables.
    dataSent      int64
    dataReceived  int64
}

func (n *Node) Transmit(msg int64, dst *Node) error
func (n *Node) Receive(msg int64, src *Node) error
func (n *Node) Info() string

func (n *Node) distance(dst *Node) float64
```

```
func (n *Node) consume(e float64) error
```

---

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych zmiennych struktury węzła (Node):

- konfiguracja (Conf) - zmienna publiczna przechowuje konfigurację węzła w formacie protocol buffer (szczegółowe informacje dostępne w 'Konfiguracja węzła').
- gotowość (Ready) - zmienna publiczna przechowuje stan gotowości węzła. Wartość 'true' oznacza, że węzeł jest gotowy do nadawania i odbierania informacji.
- następny skok (nextHop) - zmienna prywatna przechowuje adres do zmiennej węzła, będącego odbiorcą informacji nadawanych przez węzeł. Wartością domyślną w momencie rozpoczęcia symulacji jest adres głównego odbiornika danych (sink).
- energia (Energy) - zmienna publiczna przechowuje aktualny stan energetyczny węzła. W przypadku wyczerpania energii, zmienna Ready zostaje ustawiona na 'false'.
- kolejka nadawania (transmitQueue) - zmienna prywatna przechowuje informację o ilości bajtów gotowych do przekazania do następnego węzła na końcu rundy.
- kolejka odbioru (receiveQueue) - zmienna prywatna przechowuje informację o ilości bajtów odebranych przez węzeł na początku rundy.
- dane nadane (dataSent) - zmienna prywatna przechowuje sumę bajtów nadanych przez węzeł.
- dane odebrane (dataReceived) - zmienna prywatna przechowuje sumę bajtów odebranych przez węzeł.

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych funkcji węzła (Node):

- Transmit - funkcja pozwala na transmisję danych do węzła.
- Receive - funkcja pozwala na odbieranie danych przez węzeł.
- Info - funkcja generuje ciąg znaków w podstawowych informacjach na temat węzła.
- distance - funkcja wyznacza wartość odległości pomiędzy dwoma węzłami.
- consume - funkcja obciąża energetycznie węzeł.

## Sieć (Network)

Sieć (Network) reprezentuje model środowiska w którym odbywa się symulacja. Struktura ta przechowuje kontroluje przepływ informacji pomiędzy węzłami, zbiera i eksportuje informacje z poszczególnych rund.

Poniżej przedstawiona została struktura sieci oraz definicje funkcji przynależące do struktury.

---

```
type Network struct {
    Protocol    Protocol
    BaseStation *Node
    Nodes       sync.Map

    Round      int64
    MaxRounds  int64
    MsgLength  int64

    GNUPlotNodes      []string
    GNUPlotTotalEnergy []string

    PlotTotalEnergy *plot.Plot // An amount of total energy in the
              network per Round.
    PlotNodes       *plot.Plot // A number of alive nodes in the
              network per Round.
    NodesAlivePoints plotter.XYs
    NodesEnergyPoints map[int64]plotter.XYs
}

func (net *Network) AddNode(n *Node) error
func (net *Network) Simulate() error
func (net *Network) CheckNodes() int
func (net *Network) PopulateEnergyPoints()
func (net *Network) PopulateNodesAlivePoints()
```

---

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych zmiennych struktury sieci (Network):

- protokół (Protocol) - zmienna publiczna przechowuje obiekt definiujący protokół komunikacji pomiędzy węzłami.
- stacja bazowa (BaseStation) - zmienna publiczna przechowuje obiekt węzła głównego (sink).

- węzły (Nodes) - zmienna publiczna przechowuje obiekty węzłów w sieci. Implementacja przy wykorzystaniu dziennika (hashmap), który umożliwia operacje zapisu i odczytu w procesach równoległych. Kluczem dziennika jest unikatowy identyfikator węzła.
- runda (Round) - zmienna publiczna przechowuje numer aktualnej rundy symulacji.
- maksymalna ilość rund (MaxRounds) - zmienna publiczna przechowuje maksymalną ilość rund symulacji. W przypadku osiągnięcia wartości Round równej MaxRounds, symulacja zostanie przerwana.
- długość wiadomości (MsgLength) - zmienna publiczna przechowuje informację o całkowitej wielkości wiadomości (mierzonej w bajtach) jaka generowana jest podczas rundy przez każdy z węzłów. W skład tej wartości wchodzi dane pomiarowe i dodatkowy nakład informacji powstały w wyniku enkapsulacji.
- GNUPlotNodes, GNUPlotTotalEnergy - zmienne publiczne przechowujące parametry rund wykorzystywane do generowania grafów przy użyciu narzędzia GNUPlot.
- PlotTotalEnergy, PlotNodes, NodesAlivePoints, NodesEnergyPoints - zmienne publiczne przechowujące parametry rund wykorzystywane do generowania grafów przy użyciu biblioteki plotter.

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych funkcji węzła (Node):

- AddNode - funkcja pozwala na dodanie węzła do sieci.
- Simulate - funkcja umożliwia rozpoczęcie symulacji.
- CheckNodes - funkcja sprawdza ilość sprawnych węzłów w sieci.
- PopulateEnergyPoints - funkcja sprawdza oraz przechowuje stany energetyczne węzłów.
- PopulateNodesAlivePoints - funkcja sprawdza oraz przechowuje ilość sprawnych węzłów w sieci.

## Koszty transmisji

Transmisja i odbiór danych w sieci obarczony jest kosztem energetycznym. Model transmisji przedstawiony w rozdziale ‘Model transmisji’ wymaga zdefiniowania wartości liczbowych dla czterech parametrów:

---

```
const (  
    // Energy values measured in [J/byte].  
    E_ELEC = 40e-9  
    E_RX   = 4e-9  
    E_MP   = 0.0104e-12  
    E_FS   = 80e-12  
)
```

---

## Protokół (Protocol)

Protokół (Protocol) reprezentuje model protokołu komunikacji między węzłami.

Poniżej przedstawiona została interfejs protokołu oraz definicje funkcji przynależące do interfejsu.

---

```
type Protocol interface {  
    Setup(net *Network) ([]int64, error)  
    SetNodes(int)  
    SetClusters(int)  
}
```

---

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych funkcji węzła (Node):

- Setup - funkcja konfiguruje węzły w sieci zgodnie z zaimplementowanym protokołem.
- SetNodes - funkcja definiuje ilość węzłów w sieci. Wartość ta jest niezbędna do wyznaczania parametrów w protokołach (np. LEACH, PEGASIS).
- SetClusters - funkcja definiuje ilość klastrów w sieci. Wartość ta jest niezbędna do wyznaczania parametrów w protokołach (np. LEACH, PEGASIS).

Poniższa lista przedstawia zaimplementowane protokoły:

- Komunikacja bezpośrednia (Direct Communication) - wszystkie węzły w sieci komunikują się bezpośrednio z węzłem głównym (sink).
- LEACH (LEACH) - wszystkie węzły w sieci komunikują się zgodnie z topologią ustaloną w procesie konfiguracji LEACH.

- PEGASIS (PEGASIS) - wszystkie węzły w sieci komunikują się zgodnie z topologią ustaloną w procesie konfiguracji PEGASIS.

### 4.1.3 Moduł symulatora (Simulator)

Symulator (Simulator) odpowiada za tworzenie środowisk symulacyjnych. Pojedynczy obiekt symulatora pozwala na zbudowanie wielu scenariuszy symulacji, a następnie ich uruchomienie oraz wygenerowanie metryk. Dane wyjściowe mogą zostać podane dalszej analizie przy wykorzystaniu zewnętrznych narzędzi (np. GNUPlot).

---

```

type Simulator struct {
    namespace map[string]bool
    config     map[string]*config.Config
    network    map[string]*core.Network

    plotTotalEnergy *plot.Plot // An amount of total energy in the
               network per round.
    plotNodes       *plot.Plot // A number of alive nodes in the
               network per round.
}

func Create() (*Simulator, error)

func (s *Simulator) AddScenario(name string, conf *config.Config)
    error
func (s *Simulator) Run() error
func (s *Simulator) ExportPlots(filepath string) error
func (s *Simulator) ExportGNUPlots(filepath string) error

func createAndPopulateFile(filepath string, data []string) error
func (s *Simulator) create(name string, conf *config.Config) error
func createPlot(title, x, y string) (*plot.Plot, error)
func (s *Simulator) plotter() error

```

---

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych zmiennych struktury symulatora (Simulator):

- przestrzeń nazw (namespace) - zmienna prywatna przechowuje nazwy symulacji, które w jednoznaczny sposób identyfikują się i konfigurację.
- przestrzeń konfiguracji (config) - zmienna prywatna przechowuje obiekt



konfiguracji (Config) dla każdej symulacji. Kluczem dziennika jest nazwa symulacji.

- przestrzeń sieci (network) - zmienna prywatna przechowuje obiekt sieci (Network) dla każdej symulacji. Kluczem dziennika jest nazwa symulacji.

Poniższa lista przedstawia oraz opisuje znaczenie poszczególnych funkcji symulatora (Simulator):

- Setup - funkcja konfiguruje węzły w sieci zgodnie z zaimplementowanym protokołem.
- SetNodes - funkcja definiuje ilość węzłów w sieci. Wartość ta jest niezbędna do wyznaczania parametrów w protokołach (np. LEACH, PEGASIS).
- SetClusters - funkcja definiuje ilość klastrów w sieci. Wartość ta jest niezbędna do wyznaczania parametrów w protokołach (np. LEACH, PEGASIS).

## 4.2 Obsługa systemu

### 4.2.1 Konfiguracja środowiska i kompilacja

Poprawna konfiguracja środowiska wymaga instalacji niezbędnych bibliotek i pakietów.

1. Instalacja kompilatora i bibliotek Golang w wersji 1.10.1, lub wyższej.
2. Instalacja kompilatora Protocol Buffer w wersji 3.6, lub wyżej.

Weryfikacja konfiguracji Golang:

---

```
! Poprawna konfiguracja Golang.
$ which go
/usr/local/go/bin/go
$ go version
go version go1.10.1 linux/amd64
```

---

Weryfikacja konfiguracji protoc:

---

```
! Poprawna konfiguracja protoc.  
$ which protoc  
/usr/local/bin/protoc  
$ protoc -version  
libprotoc 3.6.0
```

---

Proces kompilacji (z poziomu folderu z kodem projektu):

---

```
$ pwd  
/home/<username>/go/src/github.com/keadwen/msc_project  
$ go build .
```

---

## 4.2.2 Generowanie konfiguracji

Wcześniej opisany plik konfiguracyjny jest elementem niezbędnym do uruchomienia symulacji.

Przykładowy plik konfiguracji (example.pbtxt) znajdują się w folderze proto:

---

```
protocol: 1  
nodes: <  
  id: 0  
  initial_energy: 1.0e4  
  location: <  
    X: 0  
    Y: 0  
  >  
  energy_cost <  
  >  
  time_delay: <  
  >  
>  
nodes: <  
  id: 1  
  initial_energy: 10.0e-6  
  location: <  
    X: 300.0  
    Y: 0  
  >  
  energy_cost <
```

```

>
time_delay: <
>
>
nodes <
  id: 2
  initial_energy: 20.0e-6
  location: <
    X: 500.0
    Y: 0
  >
  energy_cost: <
  >
  time_delay: <
  >
>

```

---

Oprogramowanie umożliwia również generowanie scenariuszy w dynamiczny sposób. W tym przypadku podczas uruchamiania oprogramowania (proces opisany w sekcji ‘Uruchamianie scenariuszy’) użytkownik nie podaje pliku konfiguracyjnego. Oprogramowanie stworzy identyczny zestaw konfiguracyjny dla każdego zaimplementowanego protokołu. Parametry wygenerowanej konfiguracji dostępne poniżej:

- Protokół: Bezpośrednia komunikacja, LEACH, PEGASIS
- Maksymalna ilość rund: 25000
- Proporcja węzłów typu kluster do wszystkich węzłów: 0.15
- Liczba węzłów głównych (sink): 1
- Energia węzła głównego: 100 [J]
- Lokalizacja węzła głównego na osi X: 100
- Lokalizacja węzła głównego na osi Y: 300
- Liczba węzłów: 200
- Energia węzłów: 1 [J]
- Lokalizacja węzłów na osi X: [0, 200]
- Lokalizacja węzłów na osi Y: [0, 200]

Poniższa ilustracja przedstawia rozstawienie węzłów w sieci wygenerowanych dynamicznie:



### 4.2.3 Uruchamianie scenariuszy

Przykład uruchamiania projektu z dwoma plikami konfiguracyjnymi:

---

```
$ /go/src/github.com/keadwen/msc_project/msc_project \
  --config_file=example1.proto,example2.proto
```

---

Przykład uruchamiania projektu bez pliku konfiguracyjnego:

---

```
$ /go/src/github.com/keadwen/msc_project/msc_project
```

---

### 4.2.4 Generowanie wykresów

Generowanie wykresów odbywa się przy wykorzystaniu narzędzia GNU-Plot. Proces tworzenia wykresów nie jest zautomatyzowany. Jest to dodatkowa czynność, która musi zostać wykonana manualnie po pomyślnie zakończonym procesie symulacji. W początkowym etapie tworzenia oprogramowania, zastosowane zostało rozwiązanie przy wykorzystaniu biblioteki `plotter`, która generowała dwa wykresy:

- Wykres ilości aktywnych węzłów w każdej rundzie.

- Wykres energii całkowitej posiadanej przez wszystkie węzły w każdej rundzie.

Rozwiązanie to pomimo zalet związanych z automatycznym tworzeniem wykresów, nie pozwalało na generowanie ich w jakości spełniającej wymagania pracy dyplomowej.

W momencie poprawnego zakończenia symulacji, folder `plotdata` powinien posiadać zestaw plików w formacie GNU plot. Pliki te należy następnie przekierować do GNUPlot. Poniżej przedstawiona została lista operacji umożliwiająca wygenerowanie wykresów:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ gnuplot
gnuplot> set grid
gnuplot> plot \
"< cat ./latex/gnuplot_data/test_1/leach200_m32/*" using 1:2
    smooth sbezier ls 1 title "LEACH (m=32B)", \
"< cat ./latex/gnuplot_data/test_1/pegasis200_m32/*" using 1:2
    smooth sbezier ls 2 title "PEGASIS (m=32B)", \
"< cat ./latex/gnuplot_data/test_1/direct200_m32/*" using 1:2
    smooth sbezier ls 4 title "DIRECT (m=32B)"
```

---

#### 4.2.5 Dodawanie nowych protokołów

Architektura systemu umożliwia tworzenie nowych protokołów wymiany informacji pomiędzy węzłami. Poprawna implementacja wymaga modyfikacji oprogramowania w kilku miejscach:

1. Rozszerzenie definicji enum `E_Protocol` w `proto/config.proto`.
2. Rozszerzenie `mapProtocol` w `simulator/simulator.go`
3. Stworzenie nowego pliku `.go` w folderze `core`. Struktura reprezentująca nowy protokół musi posiadać zestaw funkcji zgodny z interfejsem `Protocol`.

Po wykonaniu wszystkich z powyższych kroków, protokół może zostać wykorzystany w symulacji. Należy pamiętać, że oprogramowanie i `protocol` buffers będą wymagały rekompilacji. W przeciwnym wypadku zmiany nie będą widoczne.

# Rozdział 5

## Opracowanie wyników eksperymentów

W tym rozdziale przedstawione zostaną wyniki uzyskane w procesie symulacji przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania.

### 5.1 Dane wejściowe

Oprogramowanie posiada implementacje trzech algorytmów: komunikację bezpośrednią, LEACH oraz PEGASIS (dokładniejszy opis działania protokołów został przedstawiony w poprzednich rozdziałach). W celu porównania efektywności energetycznej pomiędzy trzema rozwiązaniami, niezbędne jest precyzyjne zdefiniowanie testów. W systemie posiadamy cztery parametry, których wartości będą modyfikowane i efekty zmian będą porównywane:

- Wielkość wiadomości - parametr ten definiuje wielkość wiadomości wysyłanej pomiędzy węzłami (mierzone w Bajtach).
- Ilość węzłów w sieci - parametr ten definiuje liczbę węzłów w pojedynczej sieci i symulacji.
- Wielkość obszaru sieci - parametr ten definiuje wielkość obszaru wymiany danych w sieci.
- Parametr 'p' - wartość prawdopodobieństwa wypromowania węzła na węzeł typu cluster head.

W celu zapewnienia poprawnej jakości porównywania testów, każdy z scenariuszy posiada dedykowany plik konfiguracyjny. W ten sposób zapewnione jest stworzenie identycznego środowiska testowego, niezależnego od testowanego protokołu.

## 5.2 Scenariusze

Każdy z testów oraz wartości przedstawione na grafie są wynikami uzyskanymi w procesie wielokrotnego uruchomienia identycznego scenariusza. Ilość uruchomień zdefiniowana dla każdego z testów (domyślenie wynosi 100). W celach testów wygenerowana została ‘konfiguracja domyślna’, w której zdefiniowana jest lokalizacja 200 unikatowych węzłów o energii początkowej wynoszącej 2 [J], rozdystrubowanych w sposób pseudolosowy na przestrzeni  $X: [0, 200]$ ,  $Y: [0, 200]$ . Scenariusze wykorzystujące np. 50 węzłów, korzystają z podzbioru węzłów domyślnych, czyli z pierwszych 50 węzłów konfiguracji domyślnej.

### 5.2.1 Test 1 - Wielkość wiadomości

Test ‘Wielkość wiadomości’ ma na celu przedstawienie zależności efektywności energetycznej dla trzech algorytmów dla różnych wielkości wiadomości wysyłanej pomiędzy węzłami.

Lista plików konfiguracyjnych:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ tree testdata/test_1/
testdata/test_1/
  direct200_m128.pbtxt
  direct200_m256.pbtxt
  direct200_m32.pbtxt
  direct200_m64.pbtxt
  leach200_m128.pbtxt
  leach200_m256.pbtxt
  leach200_m32.pbtxt
  leach200_m64.pbtxt
  pegasus200_m128.pbtxt
  pegasus200_m256.pbtxt
  pegasus200_m32.pbtxt
  pegasus200_m64.pbtxt
```

0 directories, 12 files

---

Uruchomienie oprogramowania:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ ./msc_project
--repeat_config=100 --config_files=\
testdata/test_1/direct200_m32.pbtxt,\
```

```

testdata/test_1/direct200_m64.pbtxt, \
testdata/test_1/direct200_m128.pbtxt, \
testdata/test_1/direct200_m256.pbtxt, \
testdata/test_1/leach200_m32.pbtxt, \
testdata/test_1/leach200_m64.pbtxt, \
testdata/test_1/leach200_m128.pbtxt, \
testdata/test_1/leach200_m256.pbtxt, \
testdata/test_1/pegasis200_m32.pbtxt, \
testdata/test_1/pegasis200_m64.pbtxt, \
testdata/test_1/pegasis200_m128.pbtxt, \
testdata/test_1/pegasis200_m256.pbtxt

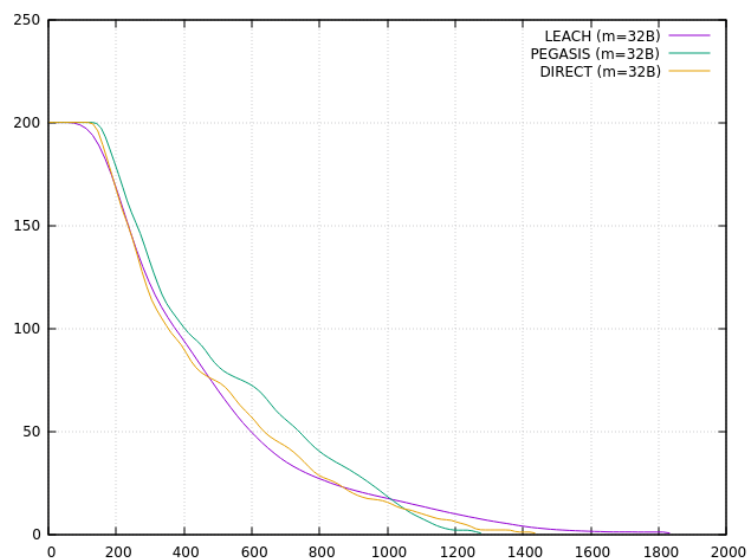
```

---

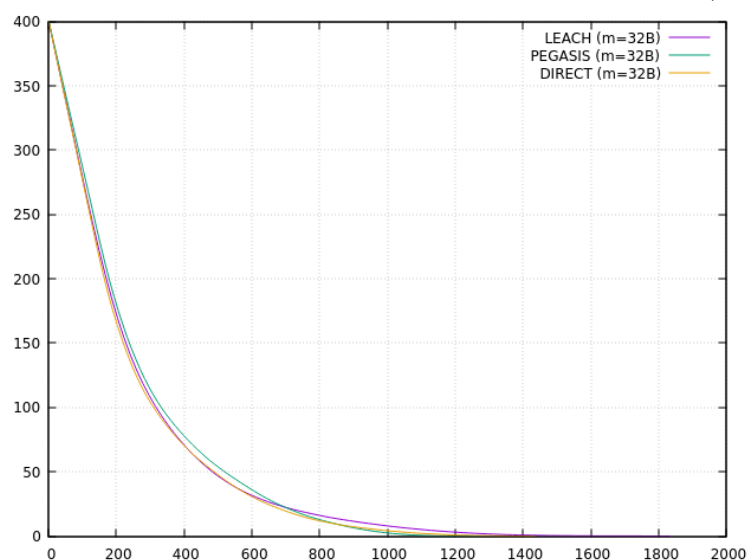
Tabela uzyskanych wyników:

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Wielkość wiadomości (B)	Kwantyl	Wartość
DIRECT	32	-	1434.00
LEACH	32	1	1430.85
		5	1499.10
		10	1518.00
		25	1570.75
		50	1635.00
		75	1696.75
		90	1764.50
		95	1783.05
		99	1805.26
		100	1831.00
PEGASIS	32	1	1135.76
		5	1146.90
		10	1152.00
		25	1165.75
		50	1184.50
		75	1203.00
		90	1224.00
		95	1234.25
		99	1262.12
		100	1274.00





Rysunek 5.1: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $m=32B$ ).



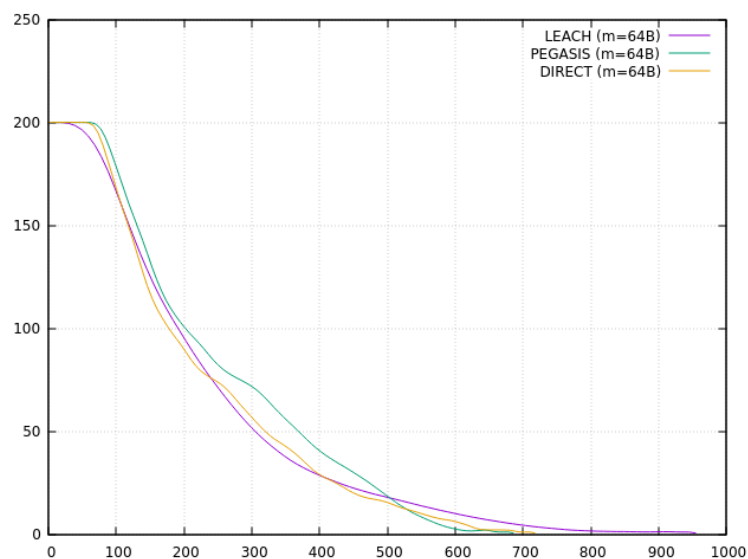
Rysunek 5.2: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $m=32B$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 1434. Dla LEACH uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -1.3% dla wartości minimalnej (1416.00), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +14.0% dla mediany (1635.00), +27.7% dla wartości maksymalnej (1636.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy

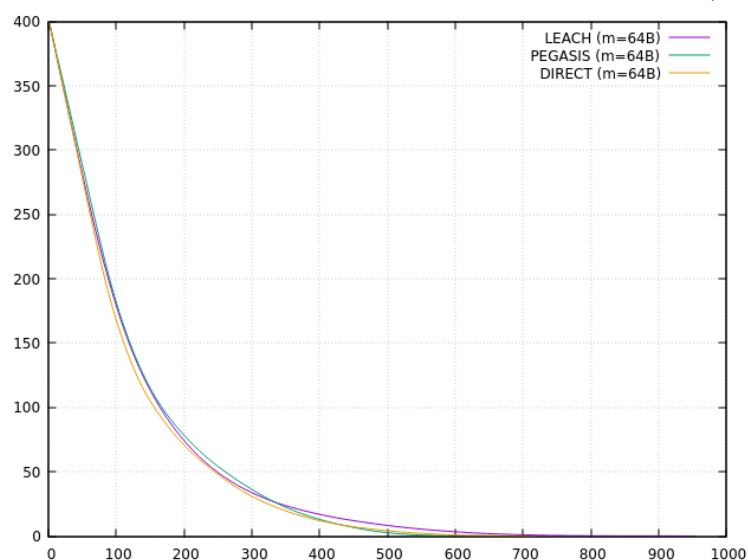
na poziomie -22.5% dla wartości minimalnej (1112.00), -17.4% dla mediany (1184.50), -11.2% dla wartości maksymalnej (1274.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest zbliżony. Zauważyć należy jednak, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 1000 rund.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Wielkość wiadomości (B)	Kwantyl	Wartość
DIRECT	64	-	717.00
LEACH	64	1	774.87
		5	759.65
		10	769.80
		25	800.75
		50	830.50
		75	872.25
		90	893.20
		95	908.40
		99	935.19
		100	954.00
PEGASIS	64	1	575.95
		5	583.95
		10	587.00
		25	594.00
		50	607.50
		75	622.25
		90	629.10
		95	635.10
		99	669.16
		100	685.00



Rysunek 5.3: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie (m=64B).



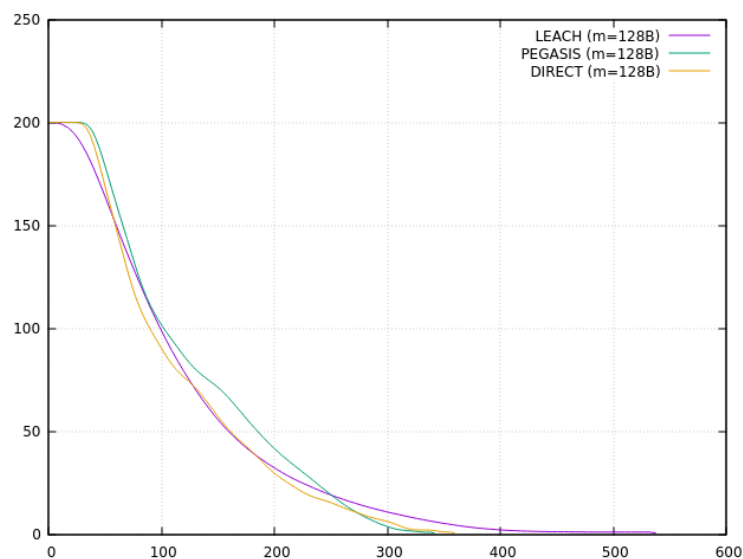
Rysunek 5.4: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie (m=64B).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 717. Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +2.1% dla wartości minimalnej (732.00), +15.8% dla mediany (830.50), +31.1% dla wartości maksymalnej (954.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -20.4% dla wartości minimal-

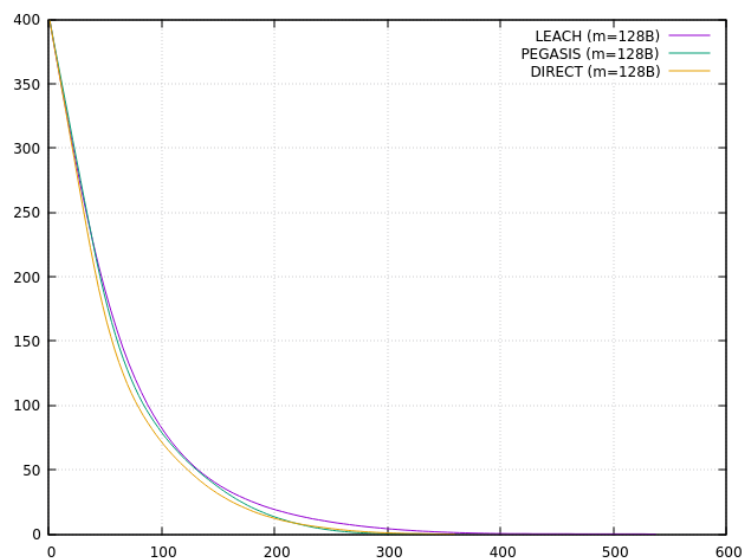
nej (571.00), -15.3% dla mediany (607.50), -4.5% dla wartości maksymalnej (685.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest zbliżony. Zauważyć należy jednak, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 500 rund.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Wielkość wiadomości (B)	Kwantyl	Wartość
DIRECT	128	-	359.00
LEACH	128	1	387.85
		5	391.95
		10	398.70
		25	408.75
		50	432.00
		75	453.25
		90	478.60
		95	492.05
		99	508.29
		100	537.00
PEGASIS	128	1	290.99
		5	295.00
		10	299.90
		25	305.00
		50	312.00
		75	318.00
		90	327.00
		95	330.10
		99	336.05
		100	341.00



Rysunek 5.5: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $m=128B$ ).



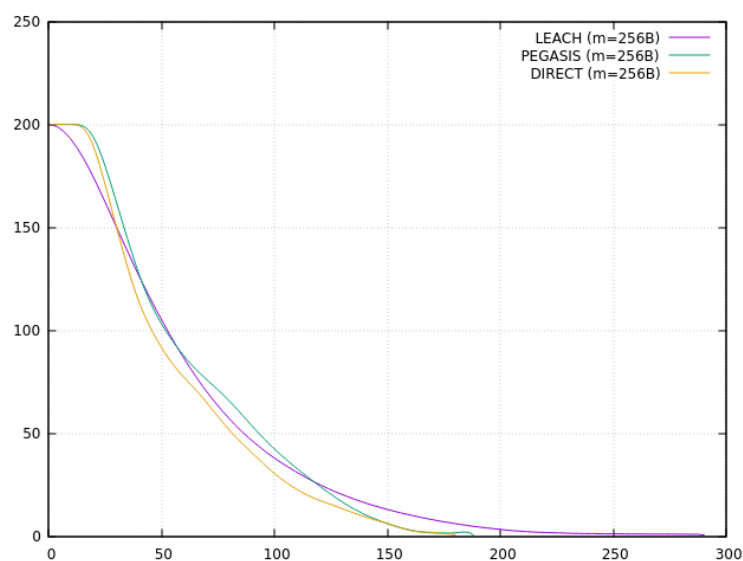
Rysunek 5.6: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $m=128B$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 359. Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +3.9% dla wartości minimalnej (373.00), +20.3% dla mediany (432.00), +49.6% dla wartości maksymalnej (537.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -19.2% dla wartości minimal-

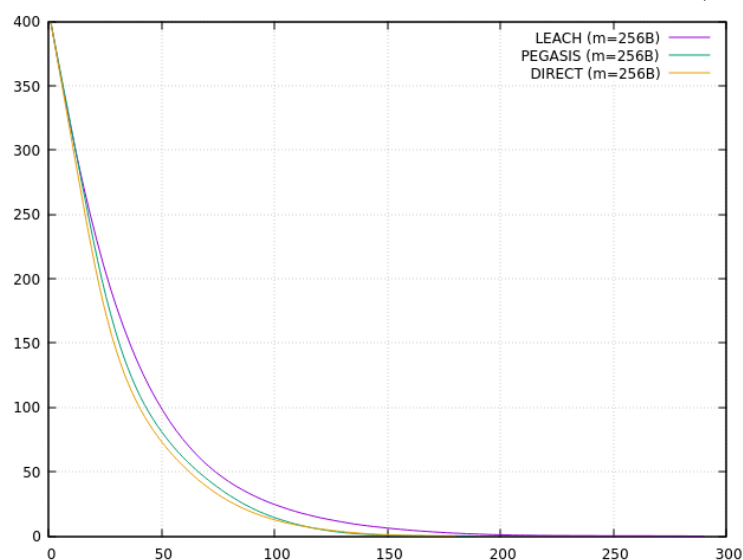
nej (290.00), -13.1% dla mediany (312.00), -5.0% dla wartości maksymalnej (341.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest zbliżony. Zauważyć należy jednak, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 250 rund.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Wielkość wiadomości (B)	Kwantyl	Wartość
DIRECT	256	-	180.00
LEACH	256	1	206.88
		5	211.90
		10	214.90
		25	224.00
		50	239.00
		75	252.00
		90	267.40
		95	281.10
		99	289.01
		100	290.00
PEGASIS	256	1	154.97
		5	157.00
		10	158.00
		25	162.00
		50	166.00
		75	170.00
		90	175.10
		95	179.00
		99	181.08
		100	188.00



Rysunek 5.7: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $m=256B$ ).



Rysunek 5.8: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $m=256B$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 180. Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +8.3% dla wartości minimalnej (195.00), +32.8% dla mediany (239.00), +61.1% dla wartości maksymalnej (290.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -15.6% dla wartości minimalnej

(152.00), -7.8% dla mediany (166.00), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +4.4% dla wartości maksymalnej (188.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest zbliżony. Zauważyć należy jednak, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 120 rund.

### 5.2.2 Test 2 - Ilość węzłów w sieci

Test ‘Ilość węzłów w sieci’ ma na celu przedstawienie zależności efektywności energetycznej dla trzech algorytmów względem ilości węzłów znajdujących się w sieci.

List plików konfiguracyjnych:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ tree testdata/test_2/
testdata/test_2/
  direct100.pbtxt
  direct150.pbtxt
  direct200.pbtxt
  direct25.pbtxt
  direct50.pbtxt
  leach100.pbtxt
  leach150.pbtxt
  leach200.pbtxt
  leach25.pbtxt
  leach50.pbtxt
  pegasis100.pbtxt
  pegasis150.pbtxt
  pegasis200.pbtxt
  pegasis25.pbtxt
  pegasis50.pbtxt

0 directories, 15 files
```

---

Uruchomienie oprogramowania:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ ./msc_project
--repeat_config=100 --config_files=\
```



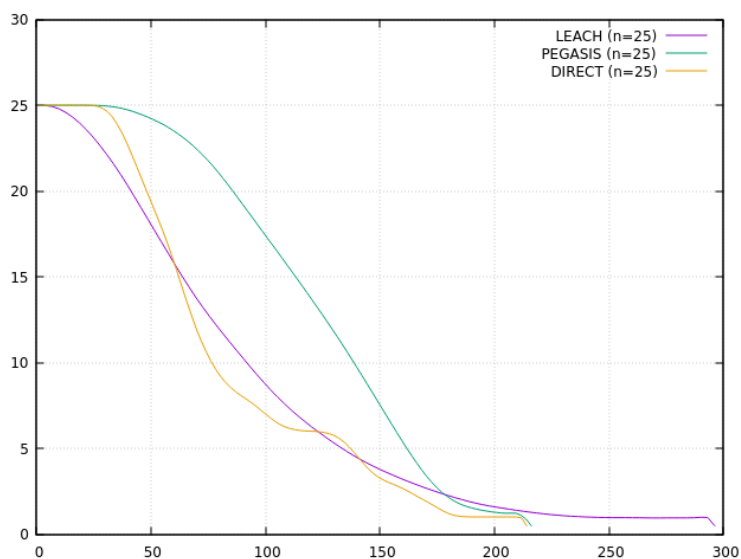
```

testdata/test_2/direct25.pbtxt,\
testdata/test_2/direct50.pbtxt,\
testdata/test_2/direct100.pbtxt,\
testdata/test_2/direct150.pbtxt,\
testdata/test_2/direct200.pbtxt,\
testdata/test_2/leach25.pbtxt,\
testdata/test_2/leach50.pbtxt,\
testdata/test_2/leach100.pbtxt,\
testdata/test_2/leach150.pbtxt,\
testdata/test_2/leach200.pbtxt,\
testdata/test_2/pegasis25.pbtxt,\
testdata/test_2/pegasis50.pbtxt,\
testdata/test_2/pegasis100.pbtxt,\
testdata/test_2/pegasis150.pbtxt,\
testdata/test_2/pegasis200.pbtxt

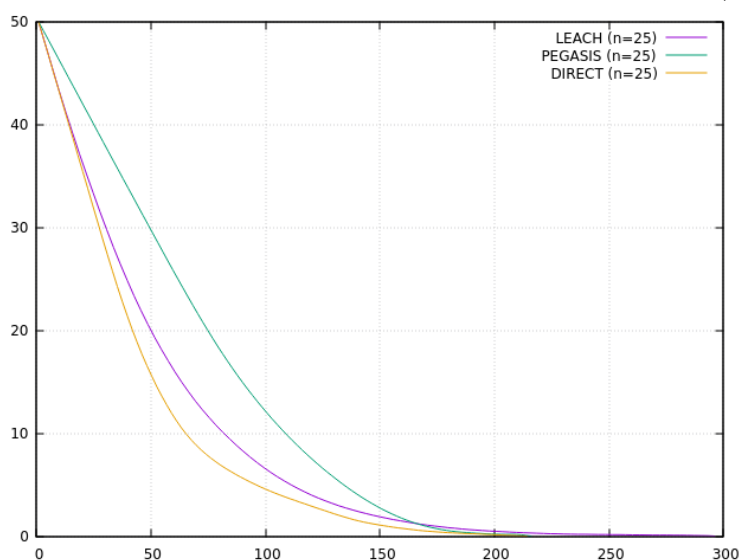
```

---

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Ilość węzłów	Kwantyl	Wartość
DIRECT	25	-	214.00
LEACH	25	1	178.99
		5	185.90
		10	196.90
		25	211.75
		50	229.50
		75	246.00
		90	263.20
		95	272.00
		99	287.09
		100	296.00
PEGASIS	25	1	169.95
		5	171.95
		10	175.90
		25	181.75
		50	186.50
		75	195.00
		90	201.10
		95	206.00
		99	215.01
		100	216.00



Rysunek 5.9: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $n=25$ ).



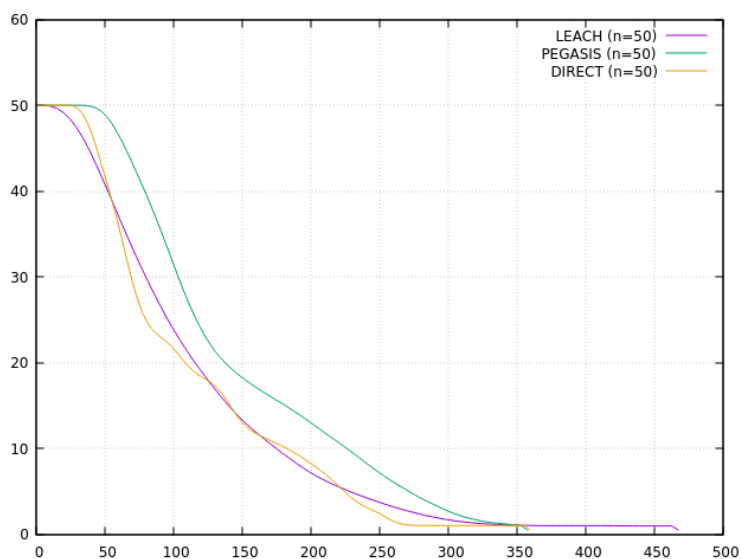
Rysunek 5.10: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $n=25$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 214 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego ‘sink’). Dla LEACH uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -16.8% dla wartości minimalnej (178.00), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +7.2% dla mediany (229.50), +38.3% dla wartości mak-

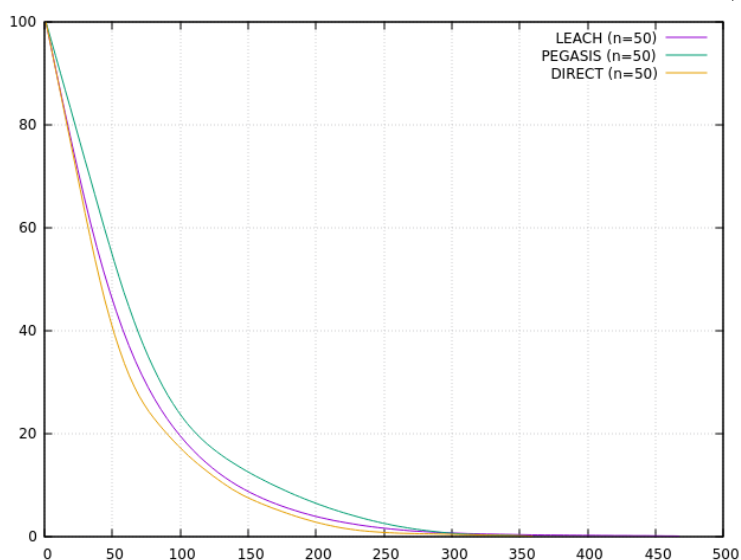
symalnej (296.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -32.9% dla wartości minimalnej (165.00), -12.9% dla mediany (186.50), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +0.9% dla wartości maksymalnej (216.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów uwidacznia różnice pomiędzy efektywnością energetyczną protokołów. Zauważyć można, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 150 rund.

Protokół	Ilość węzłów	Uzyskane rezultaty	
		Kwantyl	Wartość
DIRECT	50	-	359.00
LEACH	50	1	293.85
		5	307.00
		10	321.40
		25	356.75
		50	382.00
		75	410.00
		90	435.40
		95	443.20
		99	461.06
		100	467.00
PEGASIS	50	1	284.87
		5	291.90
		10	301.90
		25	310.00
		50	320.00
		75	331.50
		90	342.30
		95	348.00
		99	354.03
		100	357.00



Rysunek 5.11: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $n=50$ ).



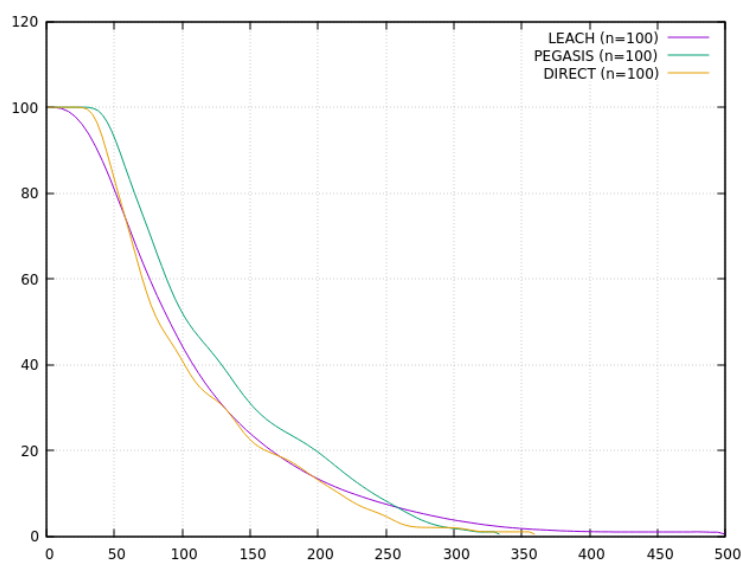
Rysunek 5.12: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $n=50$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 359 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -22.3% dla wartości minimalnej (279.00), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +6.4% dla mediany (382.00), +30.1% dla wartości mak-

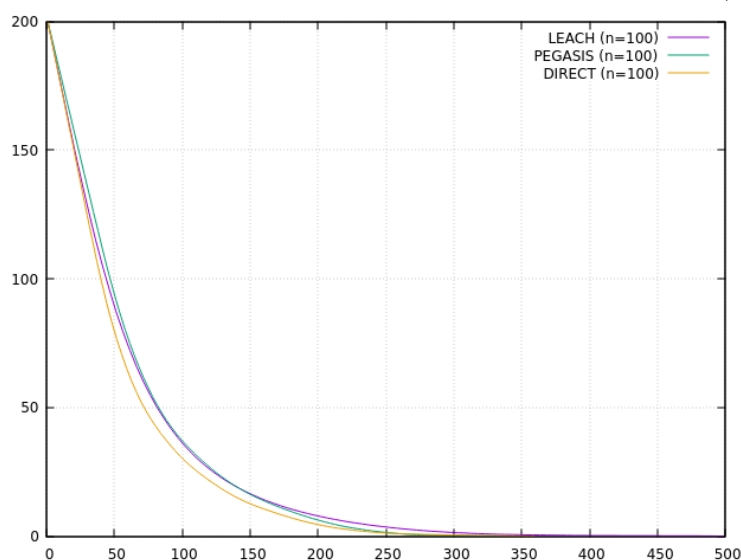
symalnej (467.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -34.2% dla wartości minimalnej (272.00), -10.9% dla mediany (320.00), -0.6% dla wartości maksymalnej (357.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest zbliżony. Zauważyć można, że PEGASIS cechuje się lepszą sprawnością energetyczną przez pierwsze 250 rund. Komunikacja bezpośrednia jest widocznie mniej efektywna.

Protokół	Ilość węzłów	Uzyskane rezultaty	
		Kwantyl	Wartość
DIRECT	100	-	359.00
LEACH	100	1	325.98
		5	346.75
		10	355.90
		25	384.75
		50	412.50
		75	439.25
		90	464.30
		95	476.60
		99	493.06
		100	499.00
PEGASIS	100	1	268.98
		5	274.00
		10	278.00
		25	284.50
		50	291.00
		75	301.00
		90	311.10
		95	314.15
		99	319.14
		100	333.00



Rysunek 5.13: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $n=100$ ).



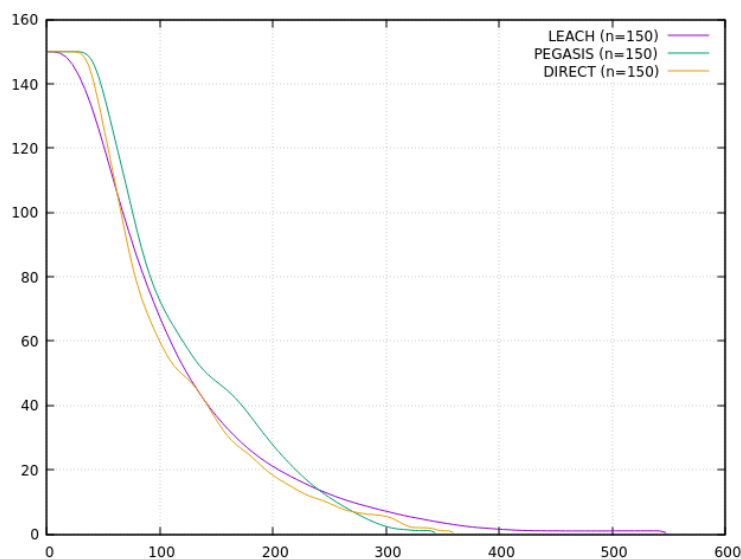
Rysunek 5.14: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $n=100$ ).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 359 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego ‘sink’). Dla LEACH uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -9.7% dla wartości minimalnej (324.00), oraz wydłużenie czasu pracy na poziomie +14.9% dla mediany (412.50), +39.0% dla wartości mak-

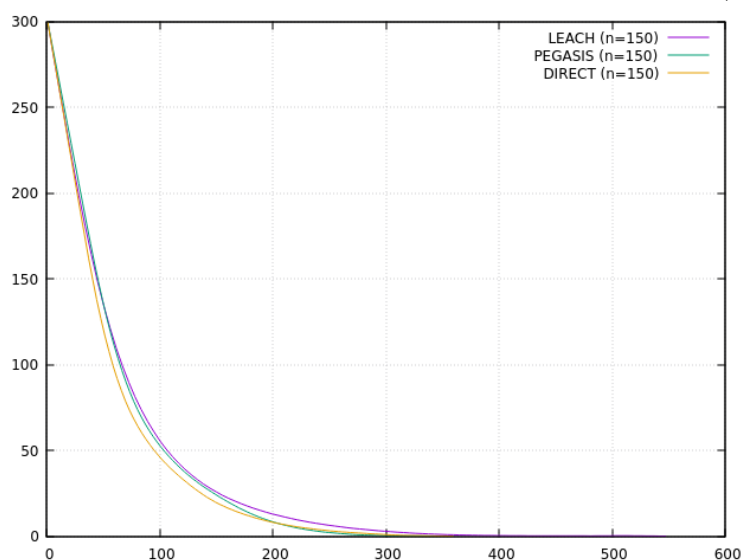
symalnej (499.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -25.6% dla wartości minimalnej (267.00), -18.9% dla mediany (291.00), -7.2% dla wartości maksymalnej (333.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie dla LEACH i PEGASIS jest niemal identyczny. Komunikacja bezpośrednia jest widocznie mniej efektywna.

Protokół	Ilość węzłów	Uzyskane rezultaty	
		Kwantyl	Wartość
DIRECT	150	-	359.00
LEACH	150	1	367.92
		5	377.85
		10	383.80
		25	398.75
		50	424.50
		75	446.50
		90	468.20
		95	484.15
		99	499.48
		100	547.00
PEGASIS	150	1	286.99
		5	292.90
		10	296.80
		25	303.50
		50	312.00
		75	322.25
		90	330.00
		95	333.00
		99	339.04
		100	343.00



Rysunek 5.15: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie (n=150).



Rysunek 5.16: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie (n=150).

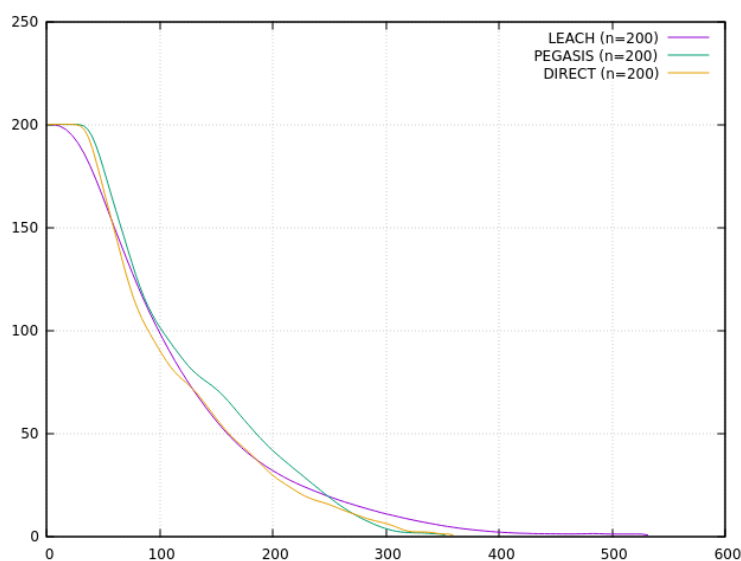
Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 359 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +0.3% dla wartości minimalnej (360.00), +18.2% dla mediany (424.50), +52.4% dla wartości maksymalnej (547.00). Dla PEGASIS uzy-



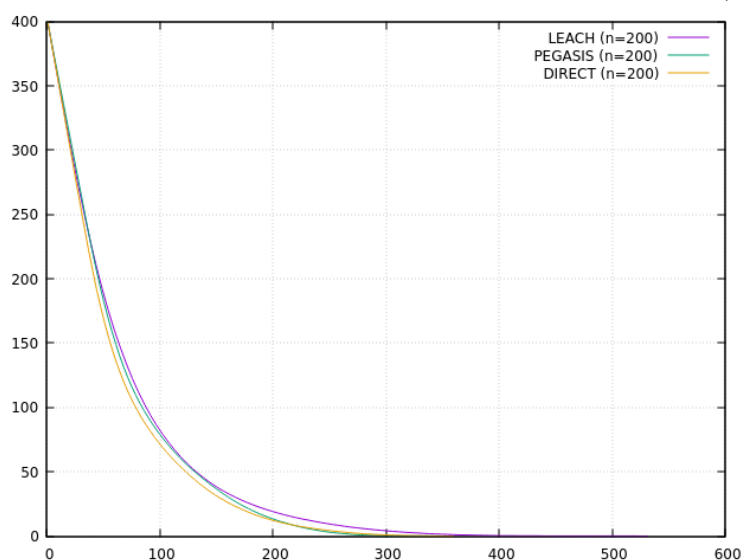
skano skrócenie czasu pracy na poziomie -20.3% dla wartości minimalnej (286.00), -13.1% dla mediany (312.00), -4.5% dla wartości maksymalnej (343.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PEGASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest niemal identyczny.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Ilość węzłów	Kwantyl	Wartość
DIRECT	200	-	359.00
LEACH	200	1	381.91
		5	398.00
		10	405.00
		25	415.00
		50	429.50
		75	449.25
		90	467.10
		95	475.05
		99	499.32
		100	531.00
PEGASIS	200	1	296.96
		5	298.95
		10	302.00
		25	307.00
		50	313.00
		75	321.25
		90	329.00
		95	335.20
		99	349.03
		100	352.00



Rysunek 5.17: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie (n=200).



Rysunek 5.18: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie (n=200).

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 359 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +3.9% dla wartości minimalnej (373.00), +19.6% dla mediany (429.50), +47.9% dla wartości maksymalnej (531.00). Dla PEGASIS uzy-

skano skrócenie czasu pracy na poziomie -18.4% dla wartości minimalnej (293.00), -12.8% dla mediany (313.00), -1.9% dla wartości maksymalnej (352.00). Pomimo niższej wartości maksymalnej uzyskanych rund pracy węzłów w PE-GASIS, ilość węzłów aktywnych w przeciągu symulacji jest wyższa niż w przypadku DIRECT czy LEACH. Zjawisko to pozwala na uzyskanie danych od większej puli węzłów aktywnych.

Rozkład ilości energii całkowitej wszystkich węzłów w rundzie jest niemal identyczny.

### 5.2.3 Test 3 - Wielkość obszaru sieci

Test ‘Wielkość obszaru sieci’ ma na celu przedstawienie zależności efektywności energetycznej dla trzech algorytmów względem wielkości obszaru sieci na której znajdują się węzły w sieci.

Istotna informacja: lokalizacja węzłów w scenariuszu 200 jest niezmienna względem pozostałych testów. Wielkość obszaru sieci była manipulowana przy użyciu skali (0.25, 0.50, 2.00, 4.00). Oznacza to, że koordynaty (X, Y) węzłów zostały przemnożone przez wartość skali. Proporcja odległości pomiędzy węzłami zostaje taka sama, jednakże zmianie ulega koszt komunikacji, gdyż funkcja kosztów energetycznych jest zależna od dystansu.

List plików konfiguracyjnych:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ tree testdata/test_3/
testdata/test_3/
  direct_xy050.pbtxt
  direct_xy100.pbtxt
  direct_xy200.pbtxt
  direct_xy400.pbtxt
  direct_xy800.pbtxt
  leach_xy050.pbtxt
  leach_xy100.pbtxt
  leach_xy200.pbtxt
  leach_xy400.pbtxt
  leach_xy800.pbtxt
  pegasis_xy050.pbtxt
  pegasis_xy100.pbtxt
  pegasis_xy200.pbtxt
  pegasis_xy400.pbtxt
  pegasis_xy800.pbtxt
```

---

Uruchomienie oprogramowania:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ ./msc_project
--repeat_config=100 --config_files=\
testdata/test_3/direct_xy050.pbtxt,\
testdata/test_3/direct_xy100.pbtxt,\
testdata/test_3/direct_xy200.pbtxt,\
testdata/test_3/direct_xy400.pbtxt,\
testdata/test_3/direct_xy800.pbtxt,\
testdata/test_3/leach_xy050.pbtxt,\
testdata/test_3/leach_xy100.pbtxt,\
testdata/test_3/leach_xy200.pbtxt,\
testdata/test_3/leach_xy400.pbtxt,\
testdata/test_3/leach_xy800.pbtxt,\
testdata/test_3/pegasis_xy050.pbtxt,\
testdata/test_3/pegasis_xy100.pbtxt,\
testdata/test_3/pegasis_xy200.pbtxt,\
testdata/test_3/pegasis_xy400.pbtxt,\
testdata/test_3/pegasis_xy800.pbtxt
```

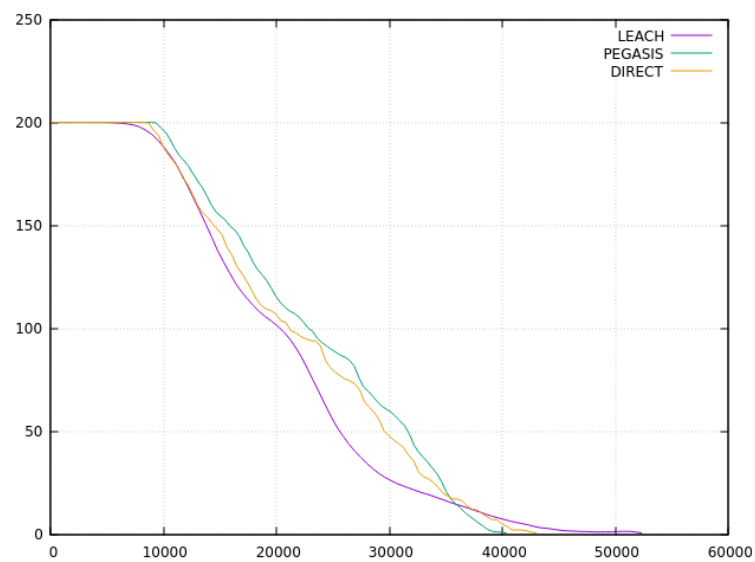
---

Poniższa tabela przedstawia wyniki uzyskane w ramach symulacji, powtórzonej 100 razy na każdym z plików konfiguracyjnych.

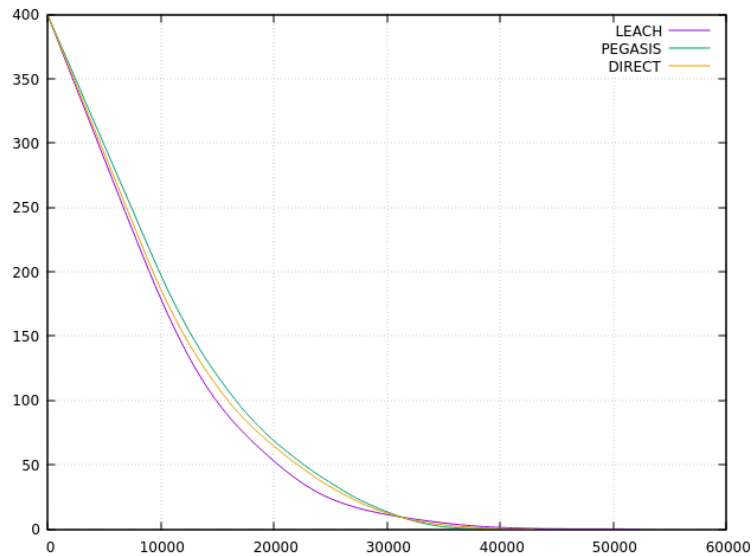
Protokół	Uzyskane rezultaty		
	Skala sieci	Percentyl	Wartość
DIRECT	0.25	-	42976.00
LEACH	0.25	1	43417.42
		5	44197.10
		10	45130.10
		25	45789.50
		50	46909.50
		75	48151.00
		90	49309.70
		95	50096.95
		99	51908.73
		100	52278.00

---

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Skala sieci	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.25	1	38521.39
		5	38723.70
		10	38847.20
		25	39050.25
		50	39278.50
		75	39543.75
		90	39756.10
		95	39827.65
		99	40037.81
		100	40316.00



Rysunek 5.19: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie.

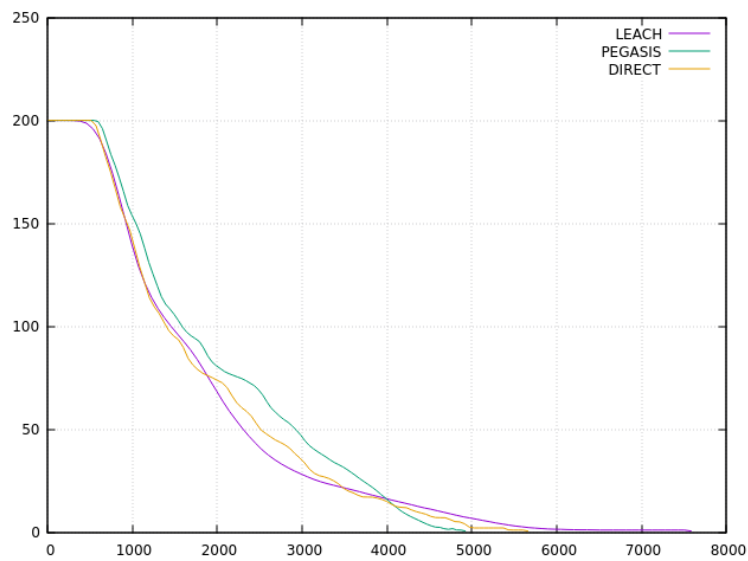


Rysunek 5.20: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie.

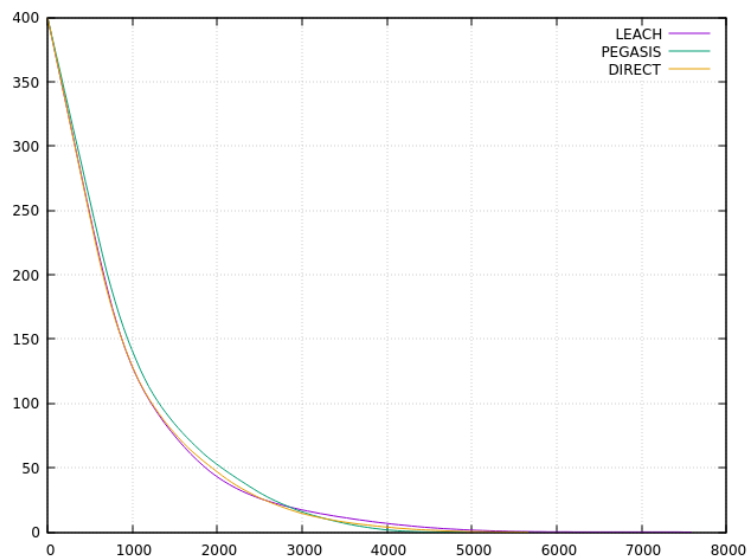
Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 42976 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +0.9% dla wartości minimalnej (43360.00), +9.2% dla mediany (46909.50), +21.6% dla wartości maksymalnej (52278.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -10.7% dla wartości minimalnej (38362.00), -8.6% dla mediany (39278.50), -6.2% dla wartości maksymalnej (40316.00). Odległości węzłów do 'sink' są czterokrotnie mniejsze niż w konfiguracji podstawowej. Czas pracy węzłów uległ znaczącemu wydłużeniu, gdyż koszt energetyczny transmisji jest niższy.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Skala sieci	Percentyl	Wartość
DIRECT	0.50	-	5657.00

Protokół	Uzyskane rezultaty		
	Skala sieci	Percentyl	Wartość
LEACH	0.50	1	5598.30
		5	5744.20
		10	5872.20
		25	6035.00
		50	6292.50
		75	6563.50
		90	6779.70
		95	6919.75
		99	7213.70
		100	7580.00
PEGASIS	0.50	1	4406.99
		5	4454.90
		10	4472.70
		25	4516.00
		50	4576.50
		75	4627.00
		90	4691.20
		95	4708.45
		99	4776.45
		100	4920.00



Rysunek 5.21: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie.



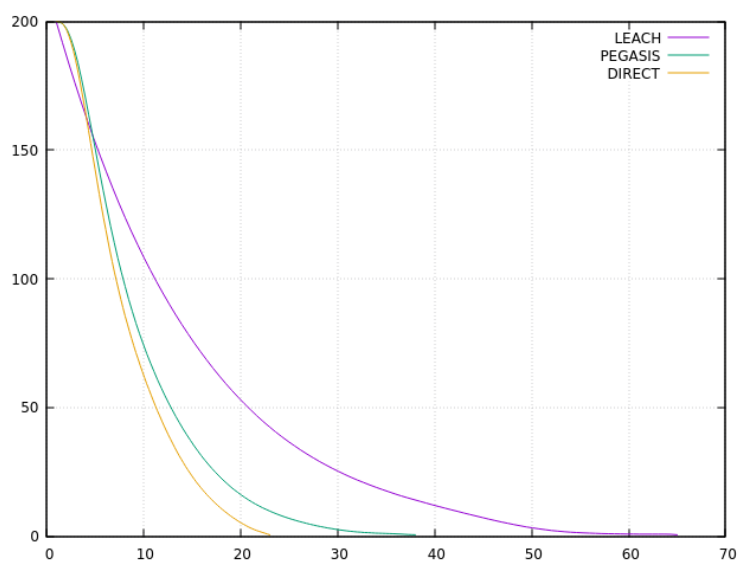
Rysunek 5.22: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie.

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 5657 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -2.3% dla wartości minimalnej (5529.00), oraz wydłużenie

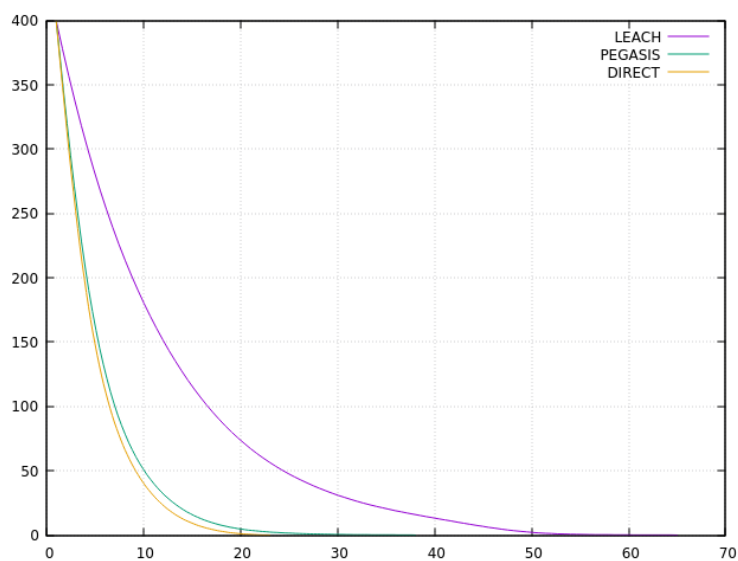


czasu pracy na poziomie +11.2% dla mediany (6292.50), +34.0% dla wartości maksymalnej (7580.00). Dla PEGASIS uzyskano skrócenie czasu pracy na poziomie -22.1% dla wartości minimalnej (4406.00), -19.1% dla mediany (4576.50), -13.0% dla wartości maksymalnej (4920.00). Odległości węzłów do 'sink' są dwukrotnie mniejsze niż w konfiguracji podstawowej. Czas pracy węzłów uległ znaczącemu wydłużeniu, gdyż koszt energetyczny transmisji jest niższy.

Protokół	Uzyskane rezultaty		
	Skala sieci	Percentyl	Wartość
DIRECT	2.00	-	23.00
LEACH	2.00	1	49.00
		5	50.95
		10	51.00
		25	53.00
		50	55.00
		75	58.00
		90	60.00
		95	61.05
		99	63.02
		100	65.00
PEGASIS	2.00	1	27.00
		5	28.95
		10	29.00
		25	30.00
		50	32.00
		75	33.00
		90	34.10
		95	36.05
		99	37.01
		100	38.00



Rysunek 5.23: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie.

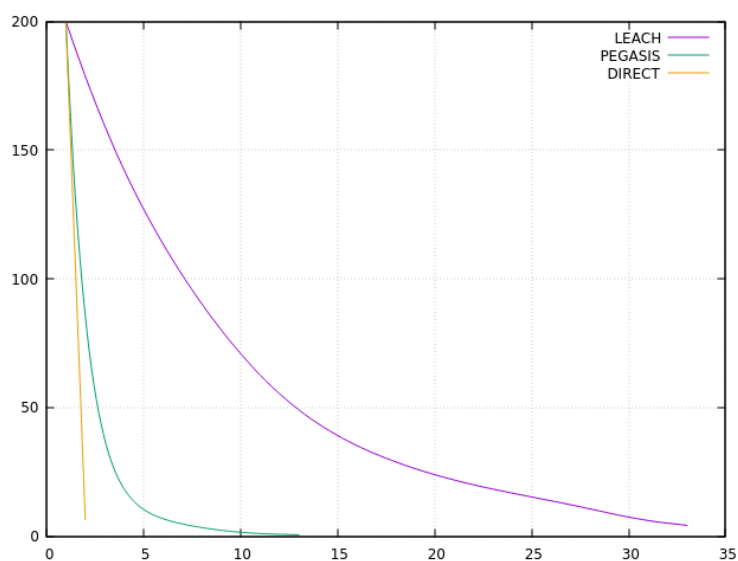


Rysunek 5.24: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie.

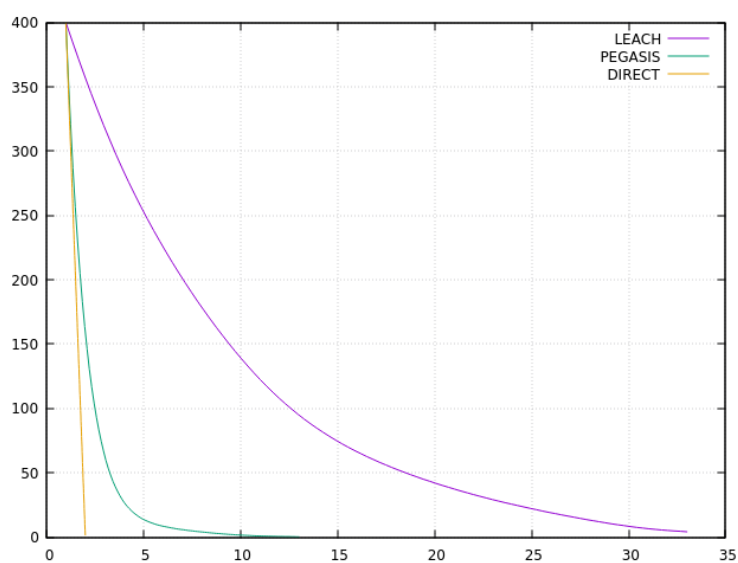
Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 23 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +213.0% dla wartości minimalnej (49.00), +239.1% dla mediany (55.00), +282.6% dla wartości maksymalnej (65.00). Dla PEGASIS

uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +117.4% dla wartości minimalnej (27.00), +139.1% dla mediany (32.00), +165.2% dla wartości maksymalnej (38.00). Odległości węzłów do 'sink' są dwukrotnie większa niż w konfiguracji podstawowej. Czas pracy węzłów uległ znaczącemu skróceniu, gdyż koszt energetyczny transmisji jest wyższy.

Protokół	Skala sieci	Uzyskane rezultaty	
		Percentyl	Wartość
DIRECT	4.00	-	2.00
LEACH	4.00	1	27.00
		5	28.00
		10	29.00
		25	29.00
		50	30.00
		75	31.00
		90	32.00
		95	32.00
		99	33.00
		100	33.00
PEGASIS	4.00	1	7.00
		5	8.00
		10	8.90
		25	9.00
		50	10.00
		75	11.00
		90	11.00
		95	12.00
		99	13.00
		100	13.00



Rysunek 5.25: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie.



Rysunek 5.26: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie.

Maksymalna ilość rund dla komunikacji bezpośredniej (DIRECT) jest parametrem stałym i wynosi 2 (uzyskana przez węzeł znajdujący się najbliższej węzła głównego 'sink'). Dla LEACH uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +1350.0% dla wartości minimalnej (27.00), +1500.0% dla mediany

(30.00), +1650.0% dla wartości maksymalnej (33.00). Dla PEGASIS uzyskano wydłużenie czasu pracy na poziomie +350.0% dla wartości minimalnej (7.00), +500.0% dla mediany (10.00), +650.0% dla wartości maksymalnej (13.00). Odległości węzłów do 'sink' są czterokrotnie większa niż w konfiguracji podstawowej. Czas pracy węzłów uległ znaczącemu skróceniu, gdyż koszt energetyczny transmisji jest wyższy.

#### 5.2.4 Test 4 - Parametr 'p'

Test 'Parametr p' ma na celu przedstawienie zależności efektywności energetycznej dla trzech algorytmów względem wartości prawdopodobieństwa wypromowania węzła na węzeł typu cluster head.

Istotna informacja: w przypadku algorytmu komunikacji bezpośredniej parametr 'p' nie istnieje. Wynika to z charakterystyki komunikacji, gdyż w protokole tym nie występuje koncept węzła typu cluster head i każdy z węzłów przesyła informacje bezpośrednio do węzła głównego (sink). Dokonać można jednak założenia, że transmisja w protokole komunikacji bezpośredniej jest specjalnym przypadkiem sieci typu LEACH, w której parametr

$$p = 1.0$$

Oznacza to, że każdy z węzłów pełni rolę węzła cluster head, który nie posiada przynależących węzłów standardowych i dokonuje transmisji tylko swoich dane.

Lista plików konfiguracyjnych:

---

```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ tree testdata/test_4/
testdata/test_4/
  direct200.pbtxt
  leach200_p005.pbtxt
  leach200_p010.pbtxt
  leach200_p015.pbtxt
  leach200_p020.pbtxt
  leach200_p025.pbtxt
  leach200_p030.pbtxt
  pegasis200_p005.pbtxt
  pegasis200_p010.pbtxt
  pegasis200_p015.pbtxt
  pegasis200_p020.pbtxt
  pegasis200_p030.pbtxt

0 directories, 13 files
```

---

Uruchomienie oprogramowania:

---

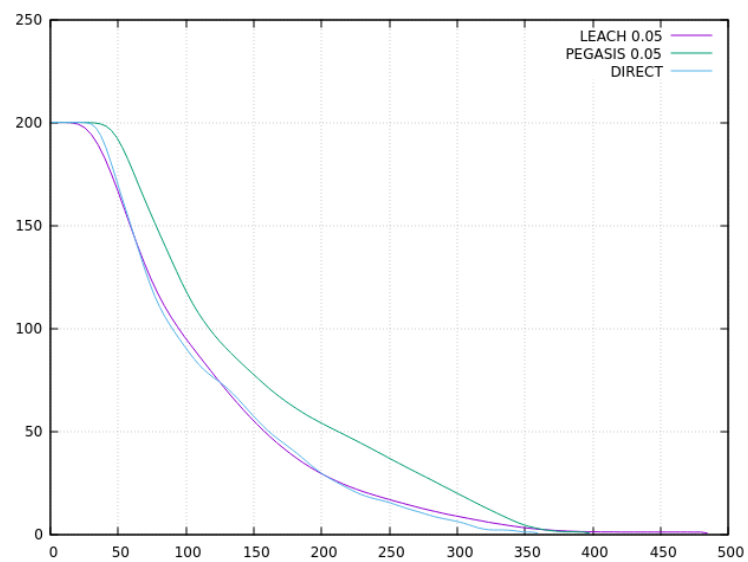
```
~/go/src/github.com/keadwen/msc_project$ ./msc_project
--repeat_config=100 --config_files=\
testdata/test_4/direct200.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p005.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p010.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p015.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p020.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p025.pbtxt,\
testdata/test_4/leach200_p030.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p005.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p010.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p015.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p020.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p025.pbtxt,\
testdata/test_4/pegasis200_p030.pbtxt
```

---

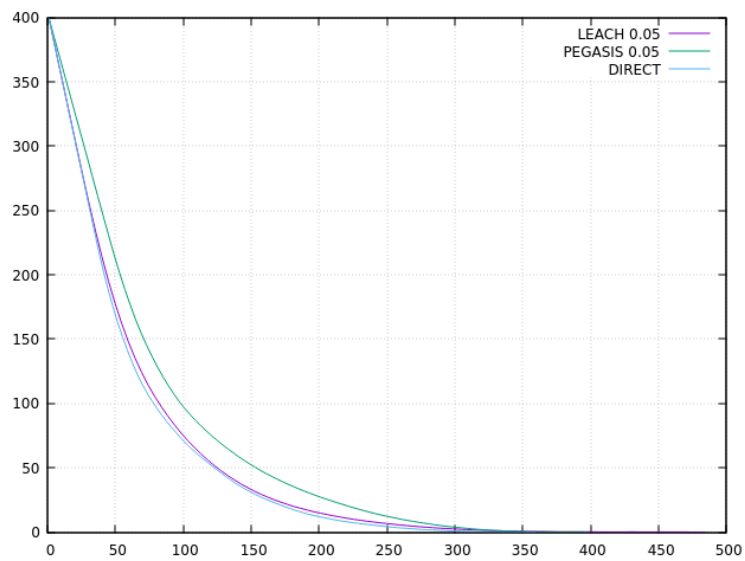
Poniższa tabela przedstawia wyniki uzyskane w ramach symulacji, powtórzonej 100 razy na każdym z plików konfiguracyjnych.

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.05	1	355.98
		5	362.90
		10	364.90
		25	383.00
		50	396.00
		75	417.00
		90	435.20
		95	455.05
		99	476.08
		100	484.00

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.05	1	345.00
		5	351.00
		10	351.90
		25	356.00
		50	365.00
		75	372.00
		90	377.00
		95	380.05
		99	387.02
		100	389.00



Rysunek 5.27: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.05$ ).

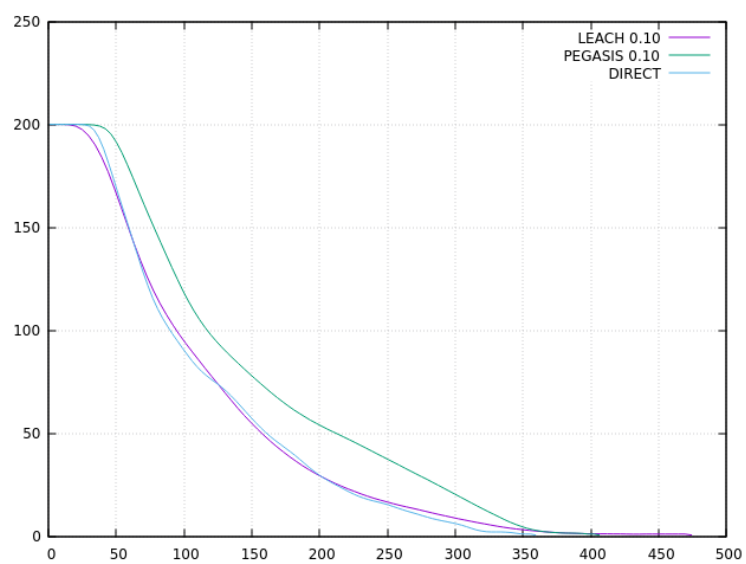


Rysunek 5.28: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.05$ ).

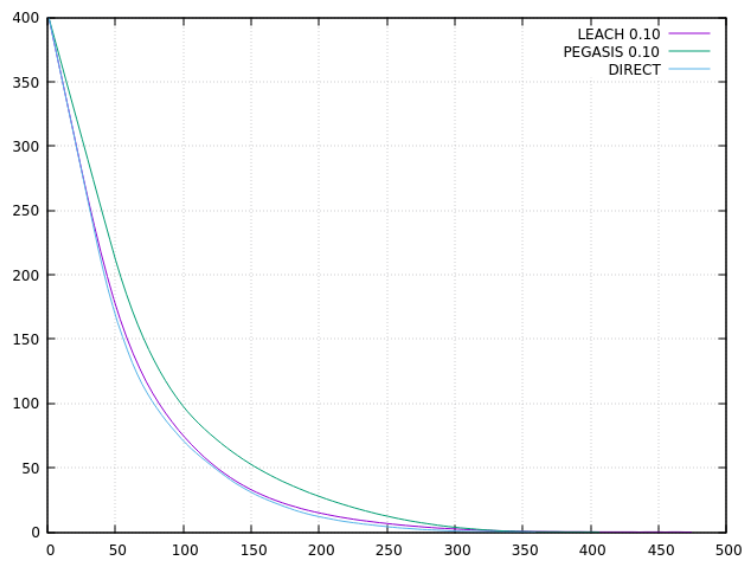
Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.10	1	364.00
		5	366.00
		10	372.90
		25	385.75
		50	400.00
		75	413.00
		90	430.00
		95	436.00
		99	455.19
		100	474.00



Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.10	1	340.99
		5	346.95
		10	351.00
		25	358.75
		50	363.50
		75	371.50
		90	377.00
		95	380.05
		99	388.07
		100	395.00



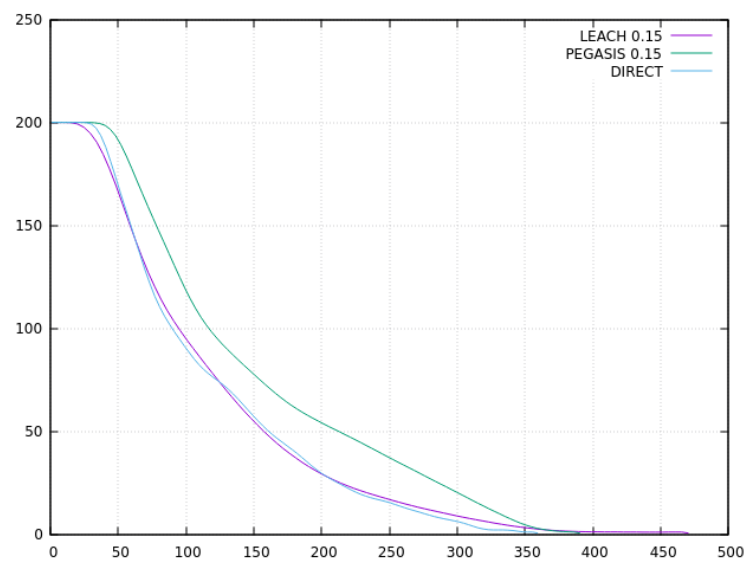
Rysunek 5.29: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.10$ ).



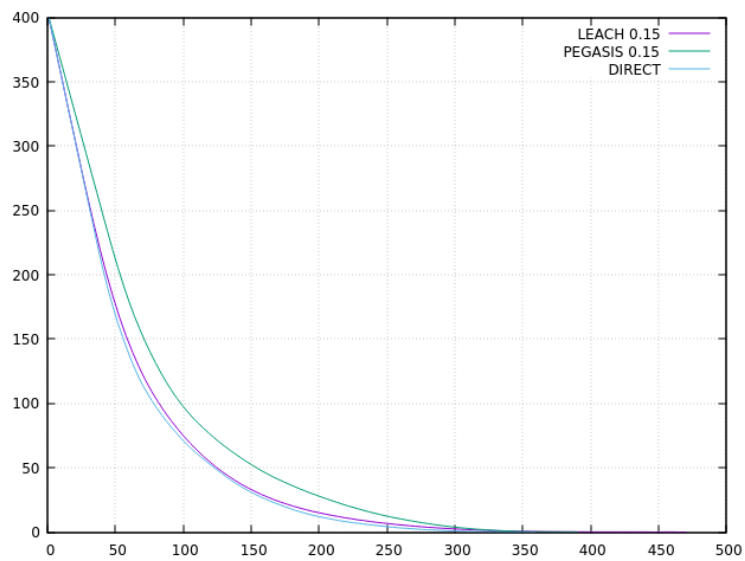
Rysunek 5.30: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.10$ ).

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.15	1	356.93
		5	366.95
		10	371.00
		25	386.00
		50	398.50
		75	418.75
		90	434.30
		95	442.25
		99	455.19
		100	470.00

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.15	1	339.95
		5	346.00
		10	350.00
		25	355.00
		50	364.50
		75	371.25
		90	382.10
		95	386.25
		99	402.09
		100	411.00



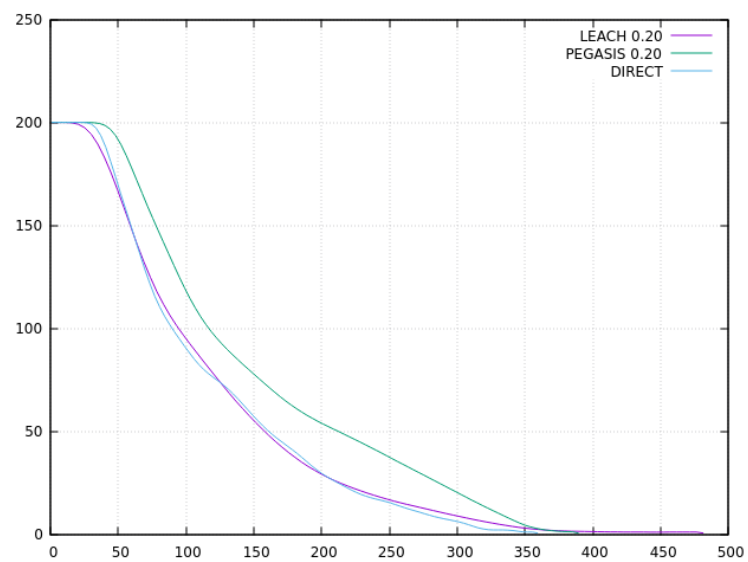
Rysunek 5.31: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.15$ ).



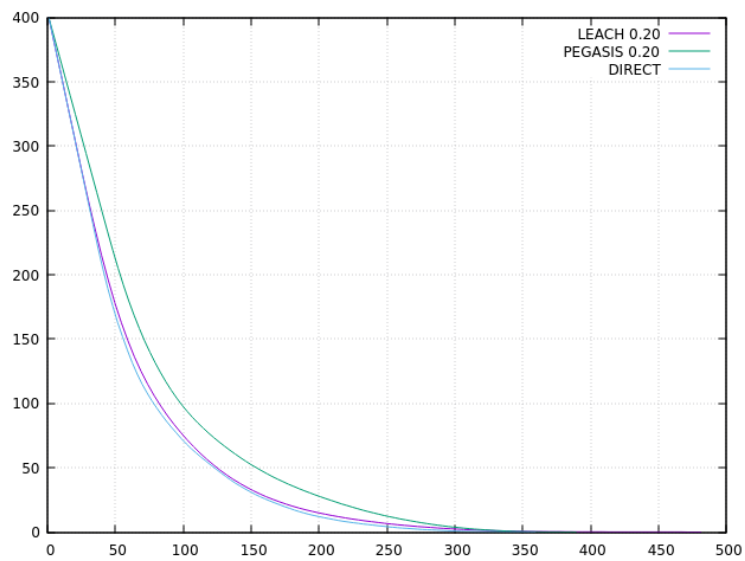
Rysunek 5.32: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.15$ ).

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.20	1	362.00
		5	365.95
		10	371.80
		25	385.75
		50	402.50
		75	423.00
		90	442.20
		95	451.00
		99	471.10
		100	481.00

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.20	1	346.97
		5	349.00
		10	352.00
		25	358.00
		50	367.00
		75	373.25
		90	378.00
		95	382.05
		99	388.09
		100	397.00



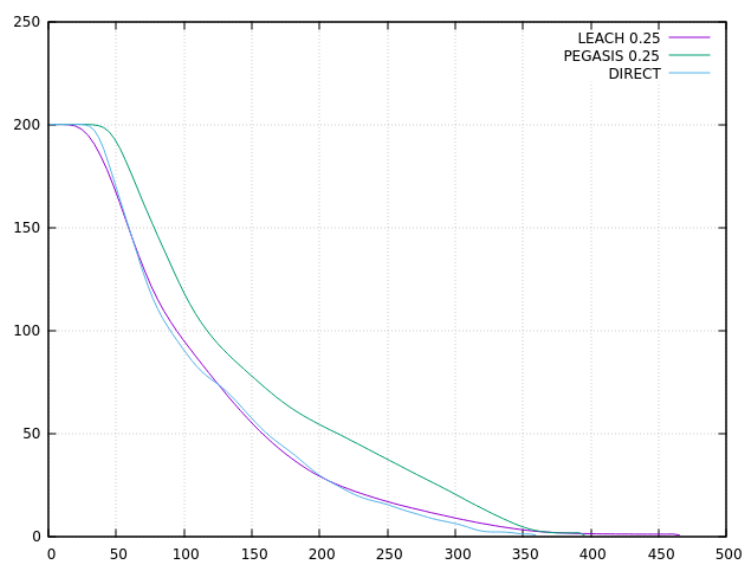
Rysunek 5.33: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.20$ ).



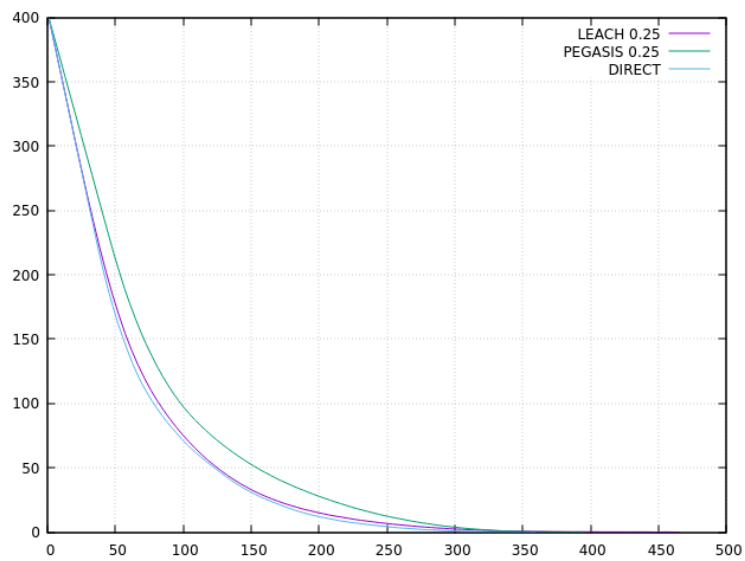
Rysunek 5.34: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.20$ ).

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.25	1	358.99
		5	363.00
		10	370.70
		25	384.00
		50	403.50
		75	429.00
		90	439.20
		95	450.00
		99	454.11
		100	465.00

Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.25	1	338.99
		5	346.90
		10	349.90
		25	355.75
		50	362.00
		75	370.00
		90	381.00
		95	385.05
		99	397.09
		100	406.00



Rysunek 5.35: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.25$ ).

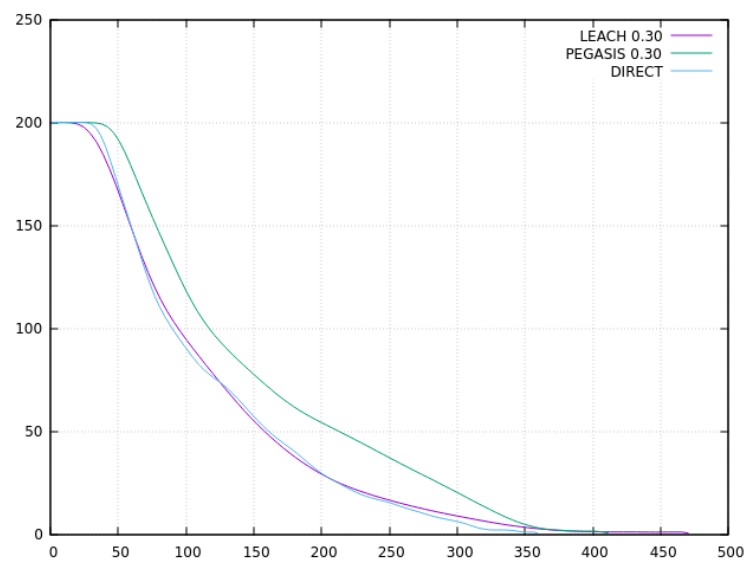


Rysunek 5.36: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.25$ ).

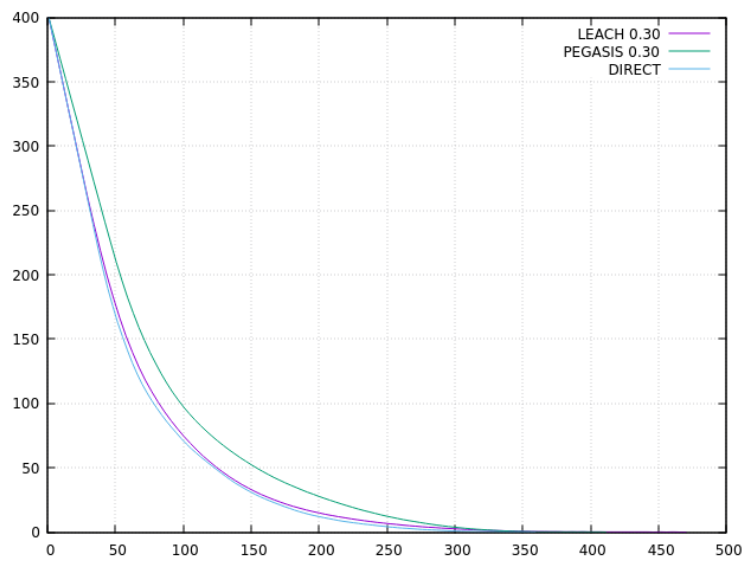
Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
DIRECT	-	-	359.00
LEACH	0.30	1	351.99
		5	368.90
		10	372.90
		25	385.00
		50	399.00
		75	418.00
		90	431.20
		95	444.10
		99	456.14
		100	470.00



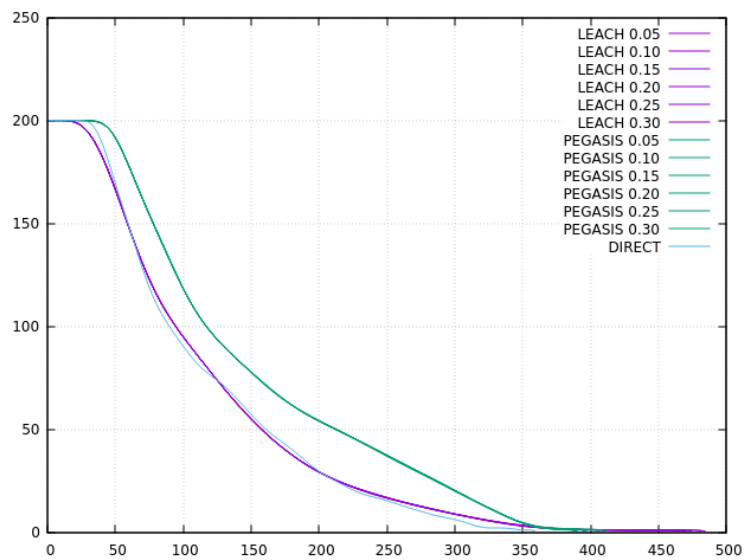
Uzyskane rezultaty			
Protokół	Parametr 'p'	Percentyl	Wartość
PEGASIS	0.30	1	347.94
		5	349.95
		10	354.00
		25	359.00
		50	365.50
		75	372.25
		90	377.10
		95	385.05
		99	389.01
		100	390.00



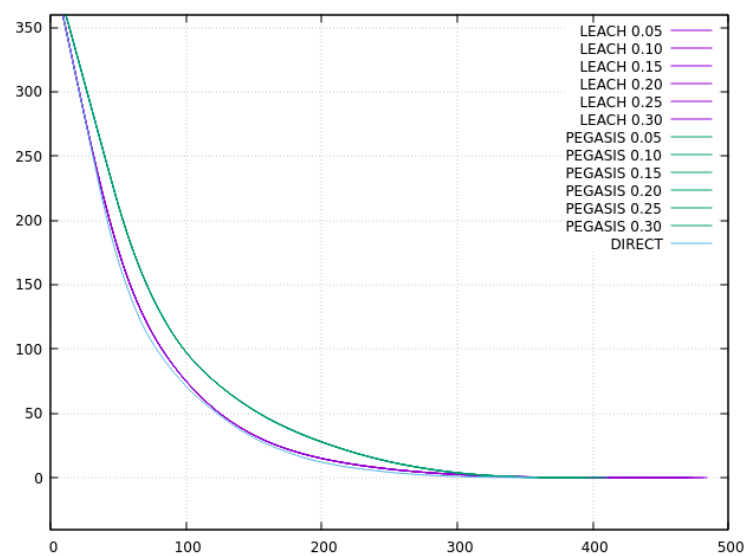
Rysunek 5.37: Funkcja ilości węzłów aktywnych w rundzie ( $p=0.30$ ).



Rysunek 5.38: Funkcja całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie ( $p=0.30$ ).



Rysunek 5.39: Funkcje ilości węzłów aktywnych w rundzie (wszystkie konfiguracje parametru  $p$ ).



Rysunek 5.40: Funkcje całkowitej ilości energii wszystkich węzłów w rundzie (wszystkie konfiguracje parametru  $p$ ).

### 5.3 Podsumowanie wyników

## Rozdział 6

### Podsumowanie

Koncepcja i projekt systemu symulującego model bezprzewodowej sieci czujnikowej został opracowany przez autora pracy. Pierwszym etapem pracy było określenie wymagań oraz funkcjonalności systemu końcowego. Pierwsze szkice dokumentacji były regularnie konsultowane z promotorem pracy. Proces ten pozwolił na zebranie szczegółowych wymagań projektowych. W końcowym etapie zbierania wymagań, autor zdecydował się tworzeniem prototypu systemu symulującego. Prace te pozwoliły na wczesne przetestowanie założeń i pomysłów dotyczących dekompozycji problemu, których efekt zaowocował uproszczeniem całkowitej architektury systemu. Projekt zrealizowano w języku Go, przy wykorzystaniu rozszerzonego systemu kontroli wersji git.

# Bibliografia

- [1] W. R. Stevens, G. R. Wright, „Biblia TCP/IP tom 1”, RM, 1998.



## **Opinia**

o pracy dyplomowej magisterskiej wykonanej przez dyplomanta

**Zdolnego Studenta i Pracowitego Kolegę**

Wydział Elektryczny, kierunek Informatyka, Politechnika Warszawska

Temat pracy

**TYTUŁ PRACY DYPLMOWEJ**

Promotor: **dr inż. Miły Opiekun**

Ocena pracy dyplomowej: **bardzo dobry**

### **Treść opinii**

Celem pracy dyplomowej panów dolnego Studenta i Pracowitego Kolegi było opracowanie systemu pozwalającego symulować i opartego o oprogramowanie o otwartych źródłach (ang. Open Source). Jak piszą Dyplomanci, starali się opracować system, który łatwo będzie dostosować do zmieniających się dynamicznie wymagań, będzie miał niewielkie wymagania sprzętowe i umożliwiał dalszą łatwą rozbudowę oraz dostosowanie go do potrzeb. Przedstawiona do recenzji praca składa się z krótkiego wstępu jasno i wyczerpująco opisującego oraz uzasadniającego cel pracy, trzech rozdziałów (2-4) zawierających opis istniejących podobnych rozwiązań, komponentów rozpatrywanych jako kandydaci do tworzonego systemu i wreszcie zagadnień wydajności wirtualnych rozwiązań. Piąty rozdział to opis przygotowanego przez Dyplomantów środowiska obejmujący opis konfiguracji środowiska oraz przykładowe ćwiczenia laboratoryjne. Ostatni rozdział pracy to opis możliwości dalszego rozwoju projektu. W ramach przygotowania pracy Dyplomanci zebrali i przedstawili w bardzo przejrzysty sposób duży zasób informacji, co świadczy o dobrej orientacji w nowoczesnej i ciągle intensywnie rozwijanej tematyce stanowiącej zakres pracy i o umiejętności przejrzystego przedstawienia tych wyników. Praca zawiera dwa dodatki, z których pierwszy obejmuje wyniki eksperymentów i badań nad wydajnością, a drugi to źródła skryptów budujących środowisko.

Dyplomanci dość dobrze zrealizowali postawione przed nimi zadanie, wykazali się więc umiejętnością zastosowania w praktyce wiedzy przedstawionej w rozdziałach 2-4. Uważam, że cele postawione w założeniach pracy zostały pomyślnie zrealizowane. Proponuję ocenę bardzo dobrą (5).

(data, podpis)

## **Recenzja**

pracy dyplomowej magisterskiej wykonanej przez dyplomanta

**Zdolnego Studenta i Pracowitego Kolegę**

Wydział Elektryczny, kierunek Informatyka, Politechnika Warszawska

Temat pracy

**TYTUŁ PRACY DYPLOMOWEJ**

Recenzent: **prof. nzw. dr hab. inż. Jan Surowy**

Ocena pracy dyplomowej: **bardzo dobry**

### **Treść recenzji**

Celem pracy dyplomowej panów dolnego Studenta i Pracowitego Kolegi było opracowanie systemu pozwalającego symulować i opartego o oprogramowanie o otwartych źródłach (ang. Open Source). Jak piszą Dyplomanci, starali się opracować system, który łatwo będzie dostosować do zmieniających się dynamicznie wymagań, będzie miał niewielkie wymagania sprzętowe i umożliwiał dalszą łatwą rozbudowę oraz dostosowanie go do potrzeb. Przedstawiona do recenzji praca składa się z krótkiego wstępu jasno i wyczerpująco opisującego oraz uzasadniającego cel pracy, trzech rozdziałów (2-4) zawierających bardzo solidny i przejrzysty opis: istniejących podobnych rozwiązań (rozdz. 2), komponentów rozpatrywanych jako kandydaci do tworzonego systemu (rozdz. 3) i wreszcie zagadnień wydajności wirtualnych rozwiązań, zwłaszcza w kontekście współpracy kilku elementów sieci (rozdział 4). Piąty rozdział to opis przygotowanego przez Dyplomantów środowiska obejmujący opis konfiguracji środowiska oraz przykładowe ćwiczenia laboratoryjne (5 ćwiczeń). Ostatni, szósty rozdział pracy to krótkie zakończenie, które wylicza także możliwości dalszego rozwoju projektu. W ramach przygotowania pracy Dyplomanci zebrali i przedstawili w bardzo przejrzysty sposób duży zasób informacji o narzędziach, Rozdziały 2, 3 i 4 świadczą o dobrej orientacji w nowoczesnej i ciągle intensywnie rozwijanej tematyce stanowiącej zakres pracy i o umiejętności syntetycznego, przejrzystego przedstawienia tych wyników. Drobne mankamenty tej części pracy to zbyt skrótowe omawianie niektórych zagadnień technicznych, zakładające dużą początkową wiedzę czytelnika i dość niestaranne podejście do powołań na źródła. Utrudnia to w pewnym stopniu czytanie pracy i zmniejsza jej wartość dydaktyczną (a ta zdaje się być jednym z celów Autorów), ale jest zrekompensowane zawartością merytoryczną. Praca zawiera dwa dodatki, z których pierwszy obejmuje wyniki eksperymentów i badań nad wydajnością, a drugi to źródła skryptów budujących środowisko. Praca zawiera niestety dość dużą liczbę drobnych błędów redakcyjnych, ale nie wpływają one w sposób istotny na jej czytelność i wartość. W całej pracy przewijają się samodzielne, zdecydowane wnioski



Autorów, które są wynikiem własnych i oryginalnych badań. Rozdział 5 i dodatki pracy przekonują mnie, że Dyplomanci dość dobrze zrealizowali postawione przed nimi zadanie. Pozwala to stwierdzić, że wykazali się więc także umiejętnością zastosowania w praktyce wiedzy przedstawionej w rozdziałach 2-4. Kończący pracę rozdział szósty świadczy o dużym (ale moim zdaniem uzasadnionym) poczuciu własnej wartości i jest świadectwem własnego, oryginalnego spojrzenia na tematykę przedstawioną w pracy dyplomowej. Uważam, że cele postawione w założeniach pracy zostały pomyślnie zrealizowane. Proponuję ocenę bardzo dobrą (5).

(data, podpis)