

**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

# Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Informatyka Stosowana  
w specjalności Inżynieria Oprogramowania

Nowe możliwości Bluetooth 5 w aplikacjach Internetu Rzeczy

inż. Krzysztof Paweł Kruk  
numer albumu 301140

promotor  
dr inż. Łukasz Makowski

WARSZAWA 2022



## **Nowe możliwości Bluetooth 5 w aplikacjach Internetu Rzeczy**

### **Streszczenie**

To jest streszczenie. To jest trochę za krótkie, jako że powinno zająć całą stronę.

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

  Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

  Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

  Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

**Słowa kluczowe:** Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Mesh, Packet Error Rate



## New Bluetooth 5 features in Internet of Things applications

### Abstract

I am going to fill this abstract with some English text. I promise :)

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

  Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

  Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

  Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

**Keywords:** Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Mesh, Packet Error Rate



# Spis treści

<b>1 Wstęp</b>	<b>9</b>
<b>2 Komunikacja radiowa bliskiego zasięgu</b>	<b>11</b>
2.1 Bluetooth Low Energy . . . . .	11
2.1.1 Historia standardu . . . . .	11
2.1.2 Stos Bluetooth Low Energy . . . . .	11
2.2 OpenThread . . . . .	11
2.2.1 Historia standardu . . . . .	11
2.2.2 Stos OpenThread . . . . .	11
2.3 ZigBee . . . . .	11
2.3.1 Historia standardu . . . . .	11
2.3.2 Stos ZigBee . . . . .	11
2.4 Porównanie przedstawionych standardów . . . . .	11
<b>3 Modele teoretyczne</b>	<b>13</b>
3.1 Zużycie energii . . . . .	13
3.1.1 Tryb ogłoszeniowy (*komentarz*: model zapożyczony z literatury) . . . . .	13
3.1.2 Tryb połączenia (*komentarz*: model zapożyczony z literatury) . . . . .	13
3.2 Packet Error Rate . . . . .	13
3.2.1 Model zależności PER od odległości i ilości między-węzłów . . . . .	13
3.2.2 Wpływ tła radiowego na model (*komentarz*: prezentacja hipotez) . . . . .	13
<b>4 Doświadczalna weryfikacja modeli</b>	<b>15</b>
4.1 Przygotowanie eksperymentu . . . . .	16
4.1.1 Sprzęt i oprzyrządowanie . . . . .	16
4.1.2 Narzędzia i elementy dodatkowe . . . . .	18
4.1.3 Oprogramowanie mikrokontrolera . . . . .	20
4.1.4 Oprogramowanie PC . . . . .	21
4.2 Zużycie energii . . . . .	21
4.2.1 Metodologia badania . . . . .	21
4.2.2 BT Low Energy - Usługa Heart Rate . . . . .	22

4.2.3	BLE Mesh - Model Generic OnOff . . . . .	25
4.3	Packet Error Rate . . . . .	27
4.3.1	Metodologia badania . . . . .	27
4.3.2	Zależność PER względem częstości zapytań . . . . .	32
4.3.3	Zależność PER względem odległości między węzłami . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>41</b>
<b>Wykaz skrótów i symboli</b>		<b>43</b>
<b>Spis rysunków</b>		<b>45</b>
<b>Spis tabel</b>		<b>47</b>
<b>Spis załączników</b>		<b>49</b>

# **Rozdział 1**

## **Wstęp**

Wstęp TBD



## **Rozdział 2**

# **Komunikacja radiowa bliskiego zasięgu**

### **2.1 Bluetooth Low Energy**

#### **2.1.1 Historia standardu**

#### **2.1.2 Stos Bluetooth Low Energy**

### **2.2 OpenThread**

#### **2.2.1 Historia standardu**

#### **2.2.2 Stos OpenThread**

### **2.3 ZigBee**

#### **2.3.1 Historia standardu**

#### **2.3.2 Stos ZigBee**

### **2.4 Porównanie przedstawionych standardów**



## Rozdział 3

# Modele teoretyczne

\*Możliwe, iż ten rozdział nie zostanie rozwinięty\*

### 3.1 Zużycie energii

- 3.1.1 Tryb ogłoszeniowy (\*komentarz\*: model zapożyczony z literatury)
- 3.1.2 Tryb połączenia (\*komentarz\*: model zapożyczony z literatury)

### 3.2 Packet Error Rate

- 3.2.1 Model zależności PER od odległości i ilości między-węzłów
- 3.2.2 Wpływ tła radiowego na model (\*komentarz\*: prezentacja hipotez)



## Rozdział 4

# Doświadczalna weryfikacja modeli

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

## 4.1 Przygotowanie eksperymentu

Eksperimentalna część pracy bezsprzecznie wymaga przygotowania odpowiedniego zestawu sprzętu i narzędzi. Konieczne jest wybranie odpowiedniej platformy sprzętowej wspierającej komunikację bezprzewodową Bluetooth Low Energy w wersji minimum 5.0. Niezbędne jest również oprzyrządowanie pomiarowe, które umożliwia pomiar natężeń prądu poniżej 1mA, ze względu na energooszczędność urządzeń Bluetooth Low Energy (BLE).

Badania zużycia energii wymagają aparatury, która w pełni zarejestruje minima i maksima poboru prądu przy niskich błędach pomiarowych.

Eksperiment Packet Error Rate (PER) wymaga przygotowania wielu zestawów uruchomieniowych obsługujących komunikację BLE w konfiguracji Mesh. Dodatkowo, wymagane jest stworzenie dedykowanego oprogramowania na mikrokontroler jak i komputer osobisty. Jest to niezbędne w celu kontroli przepływu doświadczenia jak i akwizycji danych.

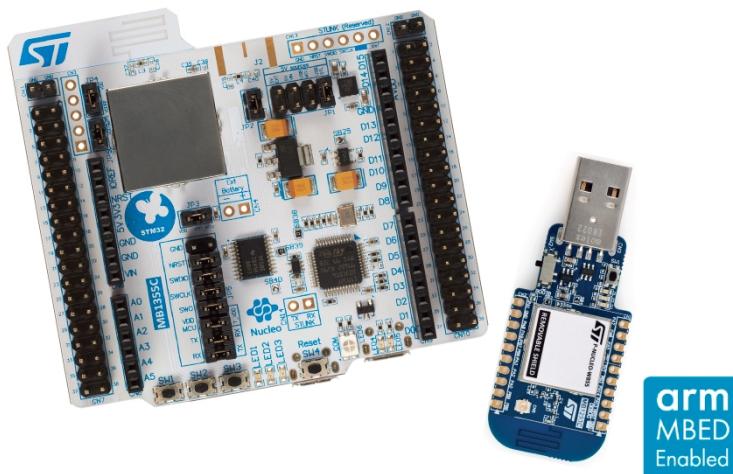
Niniejszy rozdział omawia zakres przygotowań do przeprowadzenia właściwych eksperymentów.

### 4.1.1 Sprzęt i oprzyrządowanie

Próby doświadczalne oparto o produkty firmy ST. Decyzja podjęta została w oparciu o osobiste preferencje autora pracy.

#### P-NUCLEO-WB55

Badania Bluetooth Low Energy wymagały wyboru platformy, która umożliwia eksperimentalną weryfikację wybranych celów badawczych. Ostatecznie, zdecydowano się na wykorzystanie mikrokontrolera *STM32WB55RG*. W celu zapewnienia powtarzalności eksperymentu jak i ze względu na ograniczenia czasowe, docelową platformą badawczą stał się zestaw uruchomieniowy *P-NUCLEO-WB55* [3].



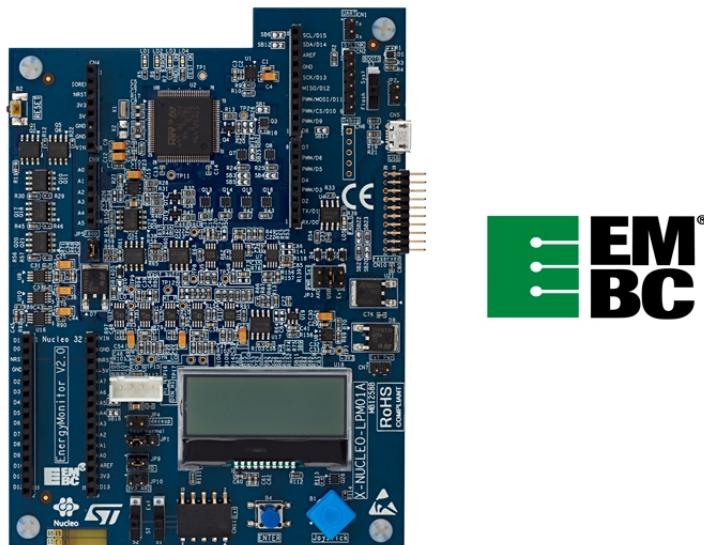
Rysunek 1. Zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55. Źródło: [3]

Zestaw ten zgodny jest ze specyfikacją Bluetooth Low Energy v5.0. Dodatkowo, wspiera on inne standardy komunikacji, m.in. Zigbee [9]. Ten fakt może zostać wykorzystany w celu bezpośredniego porównania różnych sposobów komunikacji bezprzewodowej. Nie jest to jednak celem niniejszej pracy, a stanowi możliwość jej dalszego rozwinięcia.

### X-NUCLEO-LPM01A

Płytkę rozszerzeń X-NUCLEO-LPM01A spełnia wszelkie oczekiwania dotyczące możliwości pomiarowych stawianych przed projektem. Wg oficjalnej dokumentacji [12], układ oferuje:

- Programowalne źródło napięciowe 1,8V do 3,3V
- Dynamiczne próbkowanie w zakresie od 100nA 50mA przy maksymalnej częstotliwości 100kHz z 2%-ową dokładnością pomiarów
- Pomiar statyczny natężenia prądu do 200mA
- Integracja z aplikacją do dedykowaną aplikacją akwizycji danych [6]



Rysunek 2. Zestaw pomiarowy X-NUCLEO-LPM01A. Źródło: [13]

Moduł ten nie ogranicza się tylko do wykorzystywania autorskich złącz firmy ST. Schemat wprowadzeń pinów umożliwia wykorzystanie popularnych platform takich jak Arduino<sup>1</sup>. Co istotniejsze, wybrana płytka umożliwia zasilanie dowolnego układu dzięki wyprowadzeniu źródła napięciowego za pośrednictwem pinów (za dokumentacją: złącze CN14). Ten fakt został wykorzystany w badaniach, pozwalając uniknąć kłopotliwej konfiguracji P-NUCLEO-WB55 wymagającej tworzenia dodatkowych ścieżek lutowanych.

Dodatkową cechą tego modułu jest akwizycja danych z użyciem komputera osobistego. Dzięki dedykowanej aplikacji, dostarczanej wraz z modułem, możliwa jest akwizycja danych w czasie

---

<sup>1</sup><https://www.arduino.cc/>

rzeczywistym przy wybranych częstotliwościach próbkowania. Zebrane w ten sposób dane służą dalszym analizom, co zostało wykorzystane w niniejszej pracy.

### Narzędzia i firmware firmy ST

Firma ST wraz z zestawem uruchomieniowym udostępnia pełne zintegrowane środowisko programistyczne oraz niezbędne biblioteki i certyfikowany firmware:

- **STM32CubeIDE** [5] - multiplatformowe zintegrowane środowisko programistyczne dostarczane przez ST bazujące na otwartoźródłowym środowisku *Eclipse*<sup>2</sup>.
- **STM32CubeProgrammer** [7] - narzędzie umożliwiające wykonywanie operacji odczytu, zapisu i weryfikacji skompilowanego oprogramowania produktów STM32.
- **STM32CubeMonitor-Power** [6] - oprogramowanie służące akwizycji danych o zużyciu energii m.in. w zestawie X-NUCLEO-LPM01A Rysunek: 2.
- **Firmware STM32CubeWB** [8] - zestaw bibliotek, narzędzi oraz przykładów przeznaczonych dla mikrokontrolerów rodziny STM32WB. W skład tego repozytorium wchodzą zależności takie jak: skompilowany, zamknięty firmware ko-processora dla różnych stosów połączeń bezprzewodowych; przykłady programów wykorzystujące biblioteki HAL jak i również bezpośrednio rejestrów; przykłady BLE; przykłady BLE Mesh.

#### 4.1.2 Narzędzia i elementy dodatkowe

##### Zasilanie

Próby terenowe wymagają odrębnego, właściwego zasilania. Wybrane zestawy uruchomieniowe wykorzystują ustandaryzowane złącze komunikacyjne USB. Złącze to oprócz komunikacji oferuje zasilanie linią +5V. Przeprowadzając właściwe eksperymenty wykorzystano komercyjnie dostępne banki energii tzw. powerbanki. Są to akumulatory litowo-jonowe lub litowo-polimerowe z wbudowanym systemem zarządzania baterią<sup>3</sup> i właściwymi przetwornicami impulsowymi w celu zapewnienia odpowiedniego napięcia zasilania.

Elektronika wbudowana w magazyny energii automatycznie wyłącza zasilanie w przypadku braku podłączonego urządzenia lub gdy dane urządzenie pobiera marginalnie niskie wartości prądu. Służy to ochronie cennego i delikatnego akumulatora. Jest to cecha korzystna z punktu widzenia konsumenta kupującego powerbank w celu szybkiego ładowania urządzeń elektronicznych. Niestety, zaleta ta staje się wadą w przypadku przeprowadzanych doświadczeń. Podłączając moduł P-NUCLEO-WB55, urządzenie po pewnym okresie działania wyłącza się na skutek uruchomionych zabezpieczeń w źródle energii.

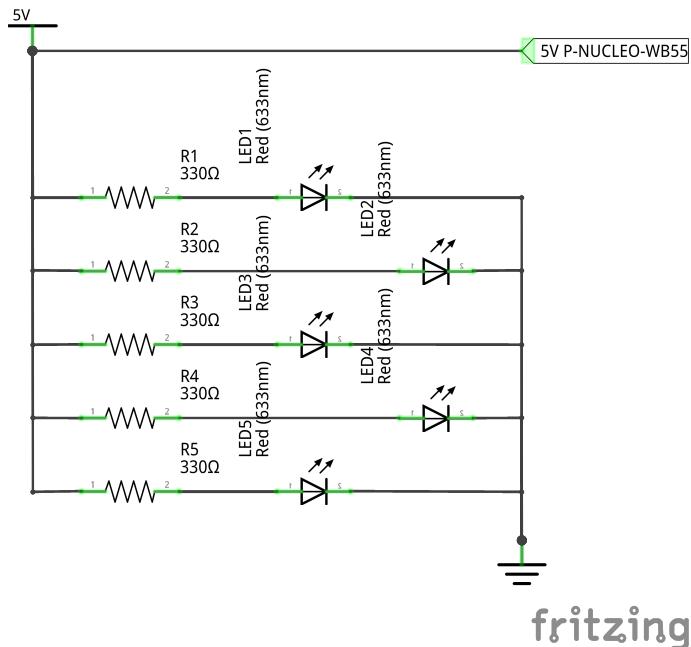
W celu skonstruowano trywialne urządzenie, które wlutowane równolegle w linię zasilania 5V, konsumuje ok. 100mA prądu ( $0,5\text{W} = 5\text{V} * 0,02\text{A} * 5$  [diod]). Doświadczalnie stwierdzono, że

---

<sup>2</sup><https://www.eclipse.org/ide/>

<sup>3</sup>Battery Management System (BMS) - ang. Battery Management System

tak włączony odbiornik energii umożliwia stabilne działanie włączonego do sieci modułu STM32. Schemat zaprezentowano na Rysunku 3



Rysunek 3. Odbiornik energii

### Obudowa - druk 3D

Kolejnym elementem niezbędnym w celu przeprowadzenia eksperymentów terenowych jest zapewnienie ochrony mechanicznej wybranych zestawów uruchomieniowych. Podczas prób elementy mogą zostać fizycznie uszkodzone poprzez m.in. wyłamanie fragmentu Printed Circuit Board (PCB) (w tym anteny), uszkodzenie pinów etc.

Wykorzystując techniki projektowania wspomaganego komputerowo<sup>4</sup>, zaprojektowano autorską obudowę. Głównym celem projektowym było zapewnienie minimalnej ochrony mechanicznej, jednocześnie redukując możliwy wpływ materiału na tłumienie sygnału. Elementy interfejsu: przyciski i antena, zostały celowo wyeksponowane. Rzut izometryczny przedstawiony został na Rysunku 4.

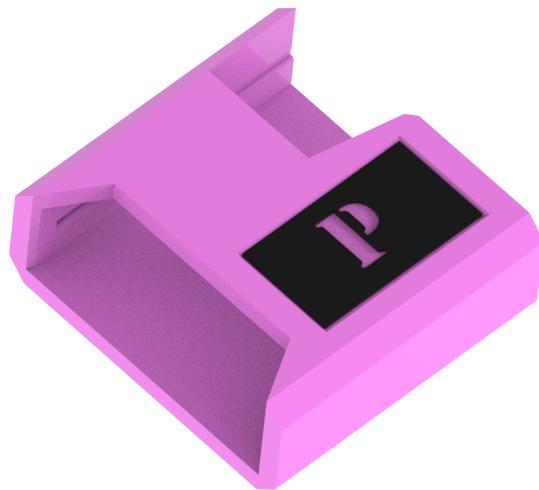
Obudowa wykonana została z materiału Polylactic Acid (PLA)<sup>5</sup> techniką druku 3D Fused Deposition Modeling (FDM)<sup>6</sup>/Fused Filament Fabrication (FFF)<sup>7</sup>. Jednobryłowa konstrukcja podyktowana została chęcią uproszczenia wydruku, kosztem zwiększenia trudności doboru tolerancji dla

<sup>4</sup>Computer-aided Design (CAD) - ang. *Computer-aided Design*

<sup>5</sup>PLA - ang. *Polylactic acid*, polilaktyd

<sup>6</sup>FDM - ang. *Fused Deposition Modeling*

<sup>7</sup>FFF - *Fused Filament Fabrication*



Rysunek 4. Model obudowy dla zestawu P-NUCLEO-WB55

umieszczanych wewnętrz płytek PCB. Obudowa przewiduje wsuwanie modułu Nucleo do wewnętrz, zapewniając jednocześnie pewne jego mocowanie.

Dobór koloru wydruku również nie był przypadkowy. Przewidując potencjalne lokalizacje przeprowadzanych doświadczeń, wybrano kolor możliwie jaskrawy. Podstawowym założeniem było ułatwienie dostrzeżenia obudowy, a wraz z obudową również zestawu uruchomieniowego, pośród flory leśnej czy terenów zurbanizowanych. Ostateczne wykonanie obudów zaprezentowano na Rysunku 5.



Rysunek 5. Obudowa zestawu uruchomieniowego Nucleo wykonana w technologii druku 3D - realizacja

#### 4.1.3 Oprogramowanie mikrokontrolera

```
1 MOBLE_RESULT Appli_Generic_OnOff_Set(Generic_OnOffStatus_t*
  pGeneric_OnOffParam ,
2                               MOBLEUINT8 OptionalValid ,
3                               MOBLEUINT16 dstPeer ,
4                               MOBLEUINT8 elementIndex)
5 {
6     /* LED control only for main element */
```

```

7   if(elementIndex == GENERIC_SERVER_MAIN_ELEMENT_INDEX)
8   {
9     // [...]
10    if(AppIoOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue == AppIoOnOffSet
11      [elementIndex].TargetValue)
12    {
13      if(dstPeer != 0xc000) {
14        increment_generic_onoff_counter_packet_error_rate_experiment(
15          AppIoOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue, dstPeer);
16      }
17      if(AppIoOnOffSet[elementIndex].Present_OnOffValue > 0)
18      {
19        BSP_LED_On(LED_BLUE);
20      }
21      else
22      {
23        BSP_LED_Off(LED_BLUE);
24      }
25    }
26  // [...]

```

**Listing 1.** Testowy kod C

#### 4.1.4 Oprogramowanie PC

## 4.2 Zużycie energii

### 4.2.1 Metodologia badania

$$E_{całkowita} = U \cdot \int_{t=0[s]}^{t=50[s]} di \, dt \quad (1)$$

$$P = \frac{E_{całkowita}}{t} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{całkowita}[J]$  - energia zużyta podczas 50s sekundowej sesji rejestracji danych

$P[W]$  - moc użytą podczas 50s sekundowej sesji rejestracji danych

$U[V]$  - napięcie zasilania mikrokontrolera - 3.3V

$di[A]$  - prąd w danej chwili

$dt[s]$  - podstawa czasowa całkowania, 0.01s/interwał (100Hz)

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer

id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

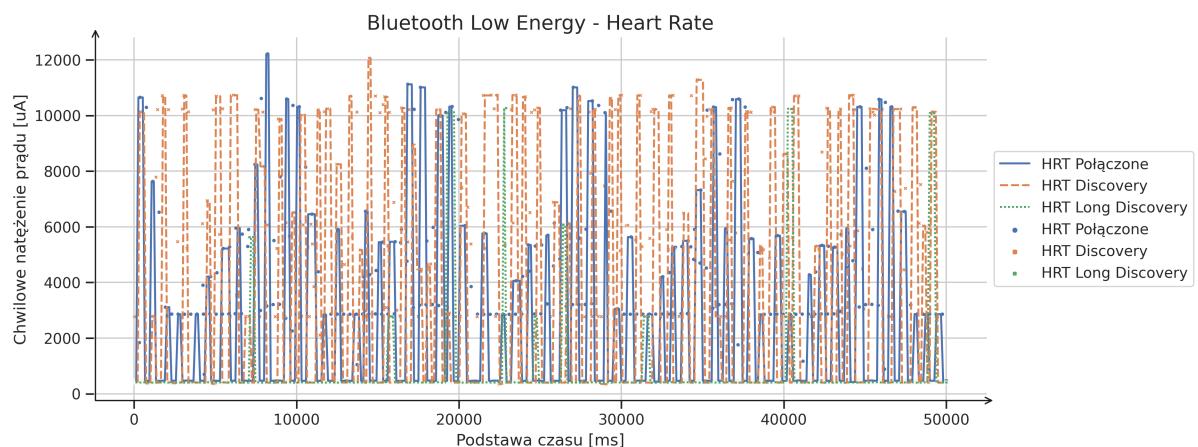
Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

#### 4.2.2 BT Low Energy - Usługa Heart Rate

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

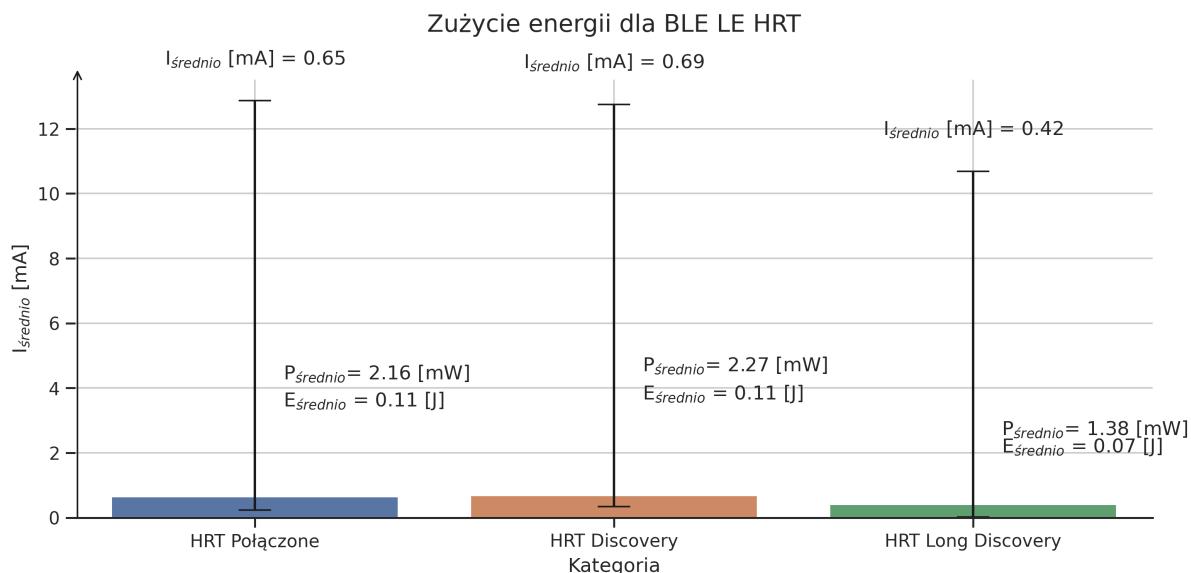
Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.



Rysunek 6. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis



Rysunek 7. Zestawienie zużycia prądu dla usługi Heart Rate w zależności od trybu działania

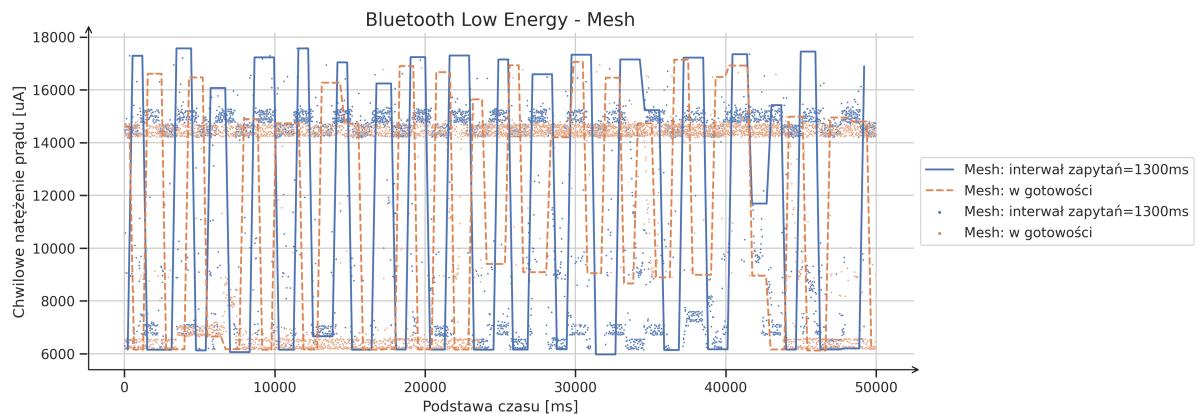
egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

### 4.2.3 BLE Mesh - Model Generic OnOff

Pomiary dla BLE Mesh uwzględniające dwa tryby działania: sieć w oczekująca na komunikaty oraz podczas działania aktywnego korzystania z Modelu Generic OnOff.

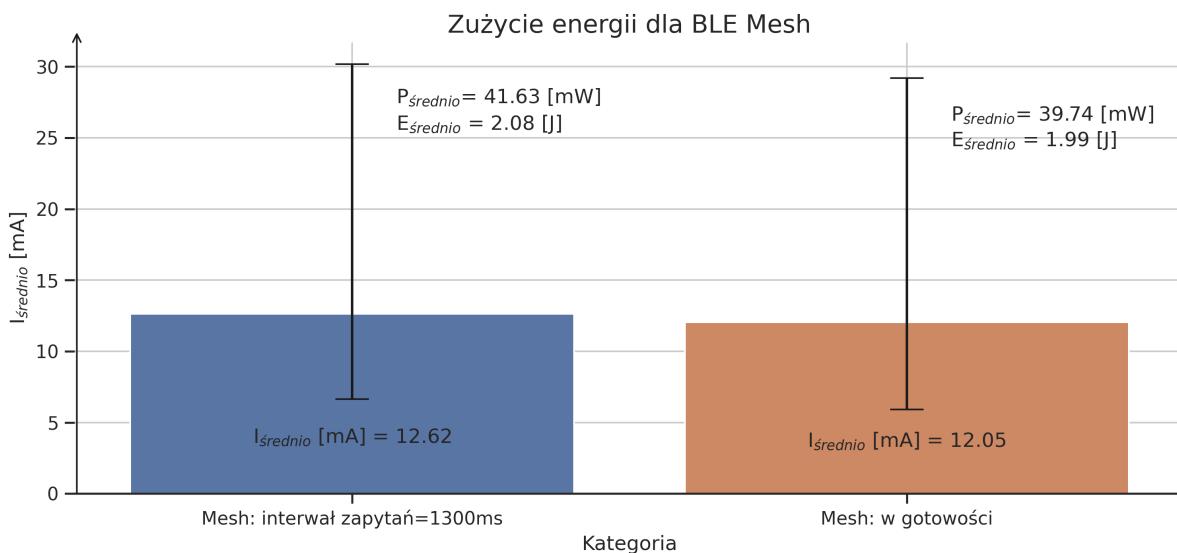


Rysunek 8. Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE Mesh i modelu Generic OnOff

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

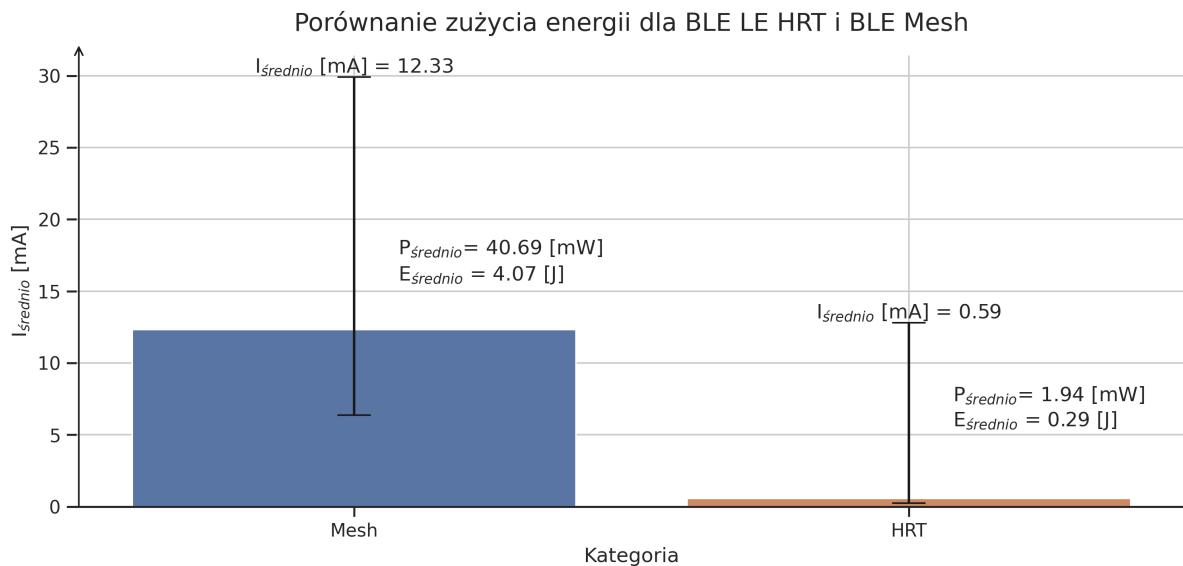


**Rysunek 9.** Zestawienie zużycia prądu dla BLE Mesh w zależności od trybu działania

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.



Rysunek 10. Porównanie średniego zużycia energii pomiędzy BT Low Energy HRT i BLE Mesh

## 4.3 Packet Error Rate

Celem niniejszego podrozdziału jest omówienie przeprowadzonego eksperymentu PER. Omówiona zostanie metodologia badań. Zdefiniowany zostanie termin *pakietu*, który stanowi podstawę dla doświadczenia.

Wychodząc z definicji, prezentuje się właściwy wzór matematyczny, definiujący badany problem. Równanie stanowi podstawę dla eksperymentu. Jego zrozumienie pozwoliło zaprojektowanie właściwego doświadczenia jak i przygotowanie kompletnego stosu technologicznego niezbędnego do jego przeprowadzenia.

Ostatecznym efektem przeprowadzonego eksperymentu jest przedstawienie zebranych danych pod postacią wykresów. Prezentują one badane cechy zmienne zaprezentowane w sekcji opisu metodologii. Końcowym krokiem jest wyciągnięcie wniosków z zebranych danych.

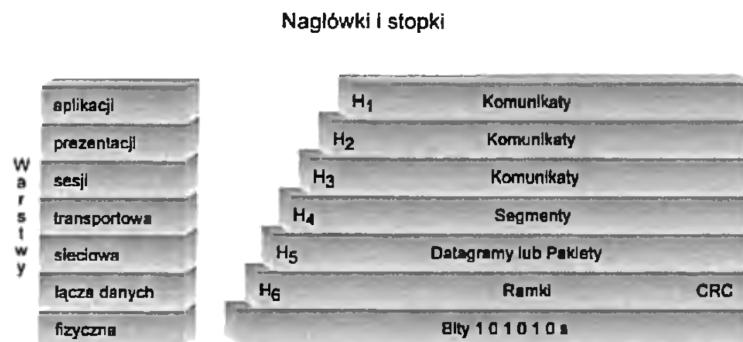
### 4.3.1 Metodologia badania

#### Definicja pakietu

Przed przystąpieniem do badań należy precyzyjnie zdefiniować wykorzystywaną terminologię.

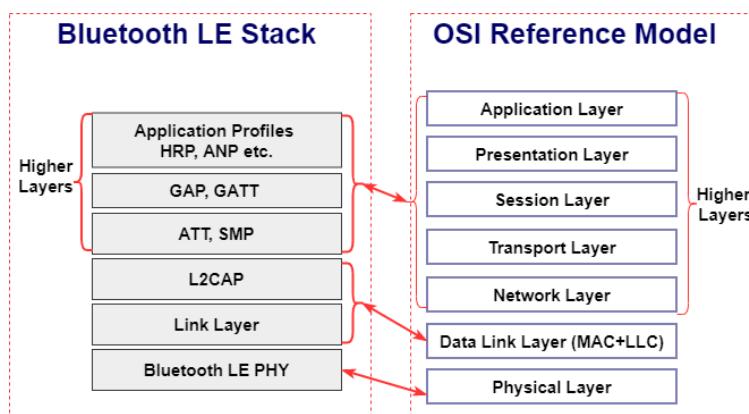
Pakietem nazywamy pojedynczą porcję danych przetwarzaną na poziomie warstwy sieciowej modelu ISO OSI [4]. Warstwa ta umożliwia routing, adresowanie logiczne oraz przetwarzanie i dostarczanie pakietów.

BLE wprowadza własną nomenklaturę dla poszczególnych warstw sieciowych. Jest to o tyle istotne, iż standard ten nie zapewnia odpowiadających modelowi ISO OSI warstw jeden-do-jednego. Część z tych warstw jest agregowanych w zespół protokołów wyższych warstw - Rysunek 12.



Rysunek 11. Model ISO OSI wraz i odpowiadające mu nazwy porcji danych. Źródło: [4]

Bazując na definicji modelu OSI oraz stosie BLE, pakietem można nazwać wiadomości będące możliwie blisko warstwy *Link Layer (LL)*. Podobną definicję prezentuje dokumentacja ST: „Pakiet to pojedyncza oznaczona wiadomość wysłana przez jedno i odebraną przez co najmniej jedno urządzenie.”<sup>8</sup> [11]



Rysunek 12. Zestawienie stosu BLE i modelu ISO OSI. Źródło: [1]

BLE Mesh dodatkowo wprowadza własne dodatkowe warstwy komunikacji, biorąc za podstawę stos BLE [2]. Każda z wymienionych warstw jest hermetyzowana za pośrednictwem dostarczanego przez producenta Application Programming Interface (API). Uwzględniając zamknięcie middleware'u i dwu-procesorową architekturę mikrokontrolera STM32WB55, oznacza to brak możliwości bezpośredniego nasłuchiwania pakietów w warstwie LL.

Uwzględniając powyższe czynniki, *pakietem* dla BLE Mesh nazywana będzie wiadomość najbliższa warstwie LL. W przypadku stworzonego oprogramowania, oznacza to odbiór komunikatu odebranego jako zdarzenie zarejestrowane przez koprocesor Cortex-M0, będący integralną częścią mikrokontrolera STM32WB55 odpowiadający za obsługę radia.

<sup>8</sup>Tłumaczenie własne

### Definicja Packet Error Rate

Posiadając definicję pakietu, PER możliwe staje się zdefiniowanie wzoru, a zarazem znaczenia głównego celu badań.

PER jest miarą ilości błędnych pakietów w proporcji do wszystkich wysłanych pakietów, zgodnie ze wzorem:

$$PER = \frac{s - r}{s} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

**s** is ilość wysłanych pakietów

**r** is ilość odebranych pakietów

**s-r** - ilość niepoprawnych/błędnych pakietów

Powyższy wzór stanowi podstawę eksperymentu pozwalającego wyznaczyć jakość łącza w zależności od wybranych parametrów zmiennych.

### Procedura badawcza

Procedurę badawczą skonstruowano bazując na wzorze 3. Niezbędnym mechanizmem, o które oparte jest doświadczenie, to zliczanie ilości pakietów. Zliczanie dotyczy zarówno węzła bliższego jak i również węzła dalszego odbierającego wysyłane komunikaty. W przypadku drugiego elementu opracowano mechanizm odczytywania licznika zmian badanej wartości, patrz: 4.1.3.

Całość doświadczenia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania PC - 4.1.4. Oprogramowanie zapewnia dwie główne funkcjonalności: wysyłanie komunikatów przy określonej częstotliwości przez zadaną ilość czasu; odczytywanie wartości licznika węzła dalszego.

Wysyłanym komunikatem jest polecenie zmiany stanu modelu *Generic OnOff*. Wybrano ten standardowy element stosu BLE Mesh ze względu na jego uniwersalność. Nie ogranicza się on jedynie do wybranej platformy czy właściwościowego modelu. Model ten jest zdefiniowany przez Bluetooth SIG przez co jest niezależny od producenta. Czyni to eksperiment powtarzalny, niezależnie od mikrokontrolera.

Odczytywanie stanu licznika wymagało wykorzystania autorskiego rozwiązania oparte o właściwy model Mesh ST. Nie wpływa to jednak na ostateczny rezultat badań, gdyż stworzone polecenia wykorzystywane jest tylko do odczytu i wysłania wartości licznika węzła dalszego do węzła bliższego i komputera osobistego kontrolującego przepływ doświadczenia. Z każdą kolejną próbą badania PER ten licznik jest automatycznie zerowany, przez co sesja zliczeń zawsze rozpoczyna się od zera.

Eksperiment wyznaczający PER oparto o następujące czynniki zmienne:

- środowisko: teren leśny, teren zurbanizowany
- interwał zapytań

- dystans pomiędzy węzłami
- ilość węzłów składających się na sieć Mesh

Wyznaczanie PER odbyło się w dwóch różnych środowiskach. Jednym z głównych hipotez jest znaczący wpływ środowiska na jakość transmisji danych. Czynniki takie jak temperatura, wilgotność, rodzaj gleby czy tło radiowe może mieć wpływ na komunikację pomiędzy węzłami. Założono, iż tło radiowe może mieć największy wpływ na transmisję danych. Stąd dobrano możliwie skrajne miejsca do badań oceniając to jako najistotniejszy czynnik:

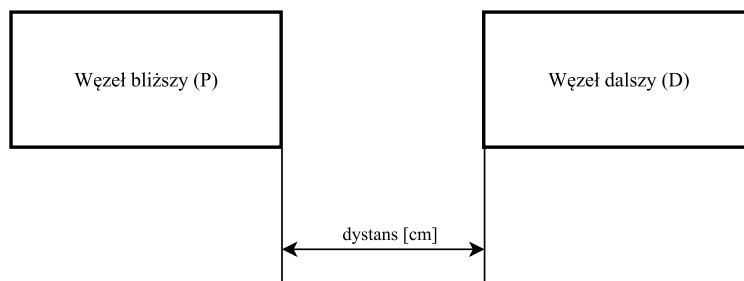
- Kampinoski Park Narodowy (lokalizacja: parking Roztoka) - jako teren leśny oddalony od ośrodka miejskiego ze względu niewielkim tłem radiowym. Pogoda: pochmurnie, wilgotno, temperatura poniżej 20°C.
- Park Pola Mokotowskie - jako teren zurbanizowany charakteryzujący się bogatym tłem radiowym działającym w pasmach Industrial, Scientific, Medical (ISM). Pogoda: słonecznie, temperatura ok. 20°C.

Kolejnym badanym czynnikiem jest interwał zapytań. Parametr ten został wybrany ze względu na obserwowane problemy z komunikacją podczas etapu tworzenia oprogramowania. Parametry dobrano w takim stopniu, by ów problem ukazać. Obrano następujące interwały:

- 100ms
- 500ms
- 800ms
- 1300ms
- 2100ms

Interesującym parametrem dla bezprzewodowej transmisji danych jest zasięg. Stąd też, jednym z badanych czynników jest określenie jakości PER w zależności od odległości - Rysunek 13.

- 1,5m
- 3,0m
- 5,0m
- 8,0m
- 13,0m
- 16,0m
- 21,0m

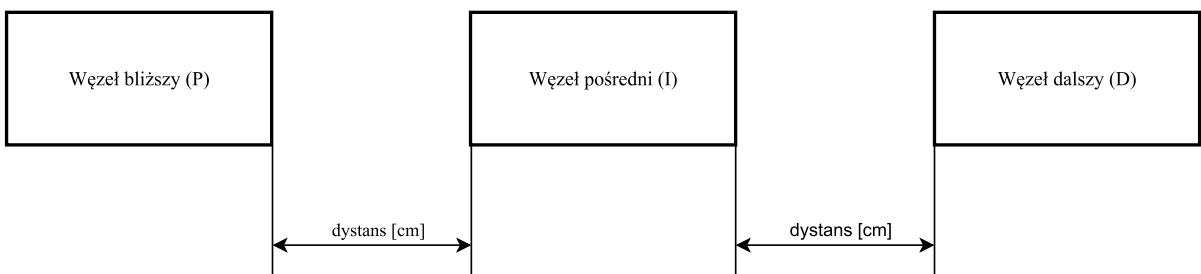


Rysunek 13. Dystans pomiędzy węzłami dla sieci dwóch mikrokontrolerów

Wyżej wymienione odległości stosowano również w przypadku kolejnego badanego parametru, tj. ilości węzłów składających się na sieć BLE. W celu łatwej identyfikacji węzłów, wprowadza się następujące nazewnictwo:

- węzeł bliższy (ang./łac. *proximal node/nodus proximalis*) - węzeł będący połączony bezpośrednio ze stacją akwizycji danych i kontroli przepływu eksperymentu.
- węzeł środkowy (ang./łac. *intermedial node/nodus [inter]medius*) - węzeł działający w trybie przekaźnika (terminologia Mesh: *Relay*). Węzeł ten nie uczestniczy bezpośrednio w badaniach tj. nie są z niego odczytywane jakiekolwiek dane.
- węzeł dalszy (ang./łac. *distal node/nodus distalis*) - węzeł zliczający ilość odebranych danych  $r$ , udostępniający jednocześnie usługę umożliwiającą odczyt tych wartości tak jak opisano to w podrozdziale 4.1.3.

Postanowiono o równoodległym rozstawieniu węzłów - Rysunek 14. Dla sieci 3 węzłów, maksymalna odległość dzieląca węzeł bliższy od węzła dalszego to 42m. Protokół badawczy zawiera informację tylko o odległości w rozumieniu równoodległego rozstawienia węzłów. Odległość pomiędzy elementami jest oczywistą operacją arytmetyczną.



Rysunek 14. Dystans pomiędzy węzłami dla sieci trzech mikrokontrolerów

Odległość pomiędzy węzłami mierzona jest z użyciem taśmy mierniczej z podziałką 1mm. Tolerancję pomiarów należy przyjąć jako najdłuższy wymiar zestawu uruchomieniowego P-NUCLEO-WB55 - 70mm [10]. Pomiar odbywał się na płasko, mierząc odległość pomiędzy leżącymi na glebie węzłami. Błędy pomiarowe wynikłe z ukształtowania terenu są prawdopodobne i wynikają z terenowego charakteru badań.

W celu zminimalizowania ryzyka pojawienia się losowych błędów o nieznanym pochodzeniu badanie powtarzano pięciokrotnie, w sposób następujący: dla wybranego środowiska, ilości węzłów i zadanej odległości pomiędzy węzłami, wykonaj 5 powtórzeń pomiarowych dla każdego z zadanych interwałów pomiarowych.

$$\exists e, \exists n, \exists d : PER_i = f(e, n, d), i = 1, \dots, 5 \quad (4)$$

gdzie:

**e** - środowisko

**n** - ilość węzłów

**d** - równoodległy dystans pomiędzy węzłami

**i** - ilość powtórzeń

**PER** - Packet Error Rate dla wybranego powtórzenia przy stałych parametrach e, n, d

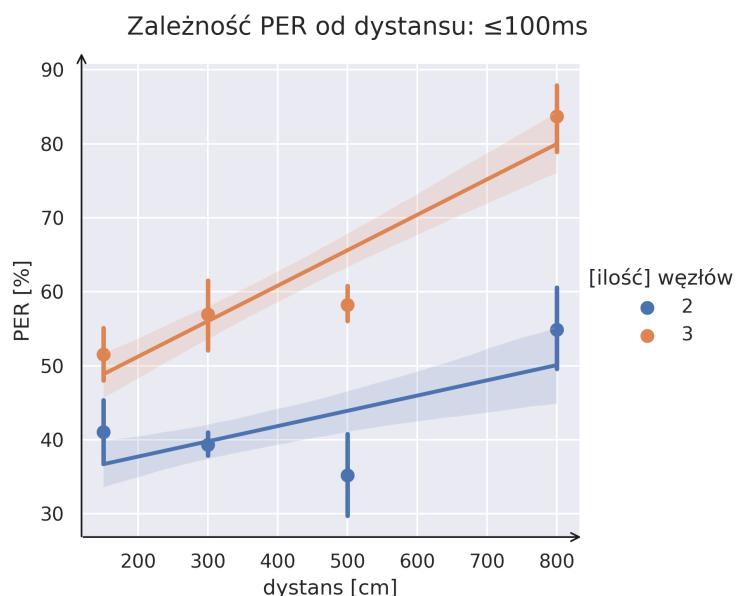
Parametry transmisji danych nie ulegały zmianie podczas przeprowadzanych doświadczeń. Poniższe wartości należy przyjąć za stałe:

- Szybkość transmisji: 2Mbps
- Moc transmisji danych: 0dBm

#### 4.3.2 Zależność PER względem częstości zapytań

Pierwszą sprawdzaną hipotezą jest empiryczna weryfikacja czy częstość zapytań wpływa na PER. W tym celu wykreślono szereg wykresów dla wybranych interwałów czasowych. Pozostałe parametry traktowane są jako stałe.

Rysunek 15 przedstawia zależność PER dla interwału 100 milisekund w zależności od odległości dla sieci złożonej z dwóch i trzech węzłów.

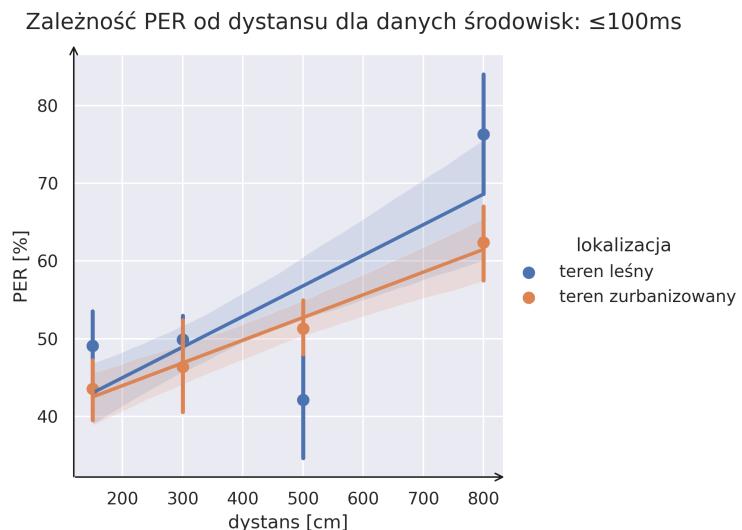


Rysunek 15. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstości  $\leq 100\text{ms}$  dla różnej liczby węzłów

Niewątpliwą cechą ukazanych danych jest wysoka wartość PER już przy tak niewielkiej odległości jak 150 cm pomiędzy węzłami. Utrata 40-50% wysyłanych pakietów danych już na pierwszym dystansie pomiarowym może być spowodowana wieloma czynnikami. Przypuszczalnie, wpływ na taki rezultat wywodzi się z czynników środowiskowych lub ze sposobu wykonywania eksperymentu. Niewykluczone są również ograniczenia sprzętowe.

Wraz ze wzrostem odległości pomiędzy węzłami PER wzrasta pomimo wysokiej wartości początkowej. Jest to oczekiwana zależność i zgodna z wiedzą techniczną.

Prowadząc dalszą analizę zależności PER od częstości zapytań, sprawdzono wpływ środowiska na jakość transmisji danych. Rysunek 16 przedstawia wybraną zależność. Rozróżnienie na ilość węzłów nie zostało tutaj uwzględnione. Pomiary przeprowadzone w najbliższym dobranym dystansie ponownie wskazują na 40-50% utratę pakietów w węźle dalszym. Analogiczne rezultaty obserwowane są na pozostałych dystansach z oczekiwana tendencją wzrostową. Wykres dodatkowo przedstawia pewną różnicę w jakości transmisji danych w zależności od środowiska. Różnica ta jednak mieści się w odchyleniu standardowym, posiadając część wspólną dla zadanych parametrów. Nie jest to wystarczające do stwierdzenia jednoznacznego wpływu środowiska.



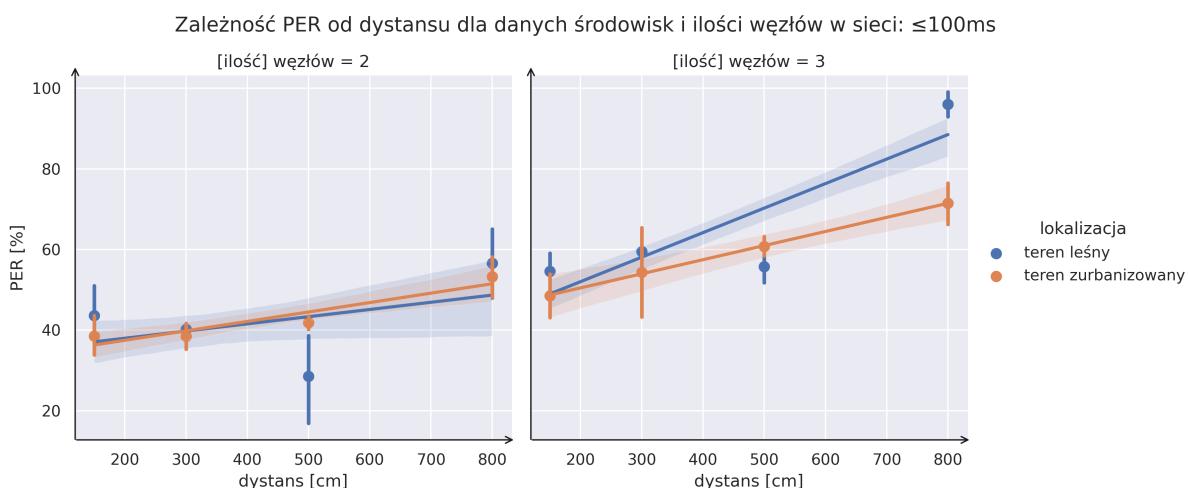
**Rysunek 16.** Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstości  $\leq 100\text{ms}$  w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów

Zestawiając ze sobą wymienione wcześniej czynniki, obserwuje się interesujące zależności. Rysunek 17 wskazuje na zależność dystansu, ilości węzłów i rodzaju środowiska dla wybranego interwału zapytań 100 milisekund. Po raz kolejny obserwowany jest PER wynoszący 40-50%, niezależnie od środowiska czy ilości węzłów. Sugeruje to wpływ samej testowanej platformy na ostateczny rezultat. Prawdopodobną hipotezą jest niewystarczająca wielkość zaalokowanych buforów obsługujących transmisję danych. Mikrokontroler nie będąc w stanie obsłużyć tak częstej transmisji może doświadczyć awarii, co zaobserwowano podczas badań. Awaria objawiała się brakiem reakcji węzła bliższego na jakiekolwiek komendy AT, co wymagało ponownego uruchomienia urządzenia. Weryfikacja tego zagadnienia wymagałaby zaangażowania zaawansowanych narzędzi programistycznych ingerujących m.in. w pamięć urządzenia. Niniejsza praca nie podejmuje się wyjaśnienia przyczyn obserwowanych anomalii w działaniu mikrokontrolera, udostępniając jednocześnie możliwy punkt dla dalszych prac badawczych z zakresu BLE Mesh.

Wpływ samego stosu łączności na PER przy zadanej częstości zapytań zdaje się potwierdzać wykres uwzględniający jakość transmisji dla dwóch węzłów. Pozioma linia interpolacji sugeruje

niewielki wpływ dystansu na PER. Dotyczy to zarówno terenu zurbanizowanego jak i terenu leśnego. Zbliżone rezultaty zdają się wykluczać czynniki zewnętrzne.

Interesującą zależnością jest nachylenie wykresu względem osi odciętych. Dla przypadku dwóch węzłów sieci, połączenie bezpośrednio między węzłami, PER jest niemal stałe na wybranych odległościach. W przypadku trzech węzłów, uwidacznia się potencjalny wpływ węzła środkowego, przekazującego pakiety z punktu bliższego do dalszego. Wraz ze wzrostem dystansu, rośnie wartość PER sięgając nawet 90% w terenie leśnym. Różne nachylenie dla wybranych środowisk również sugeruje znaczący wpływ środowiska na PER również sugeruje znaczący wpływ środowiska na PER.

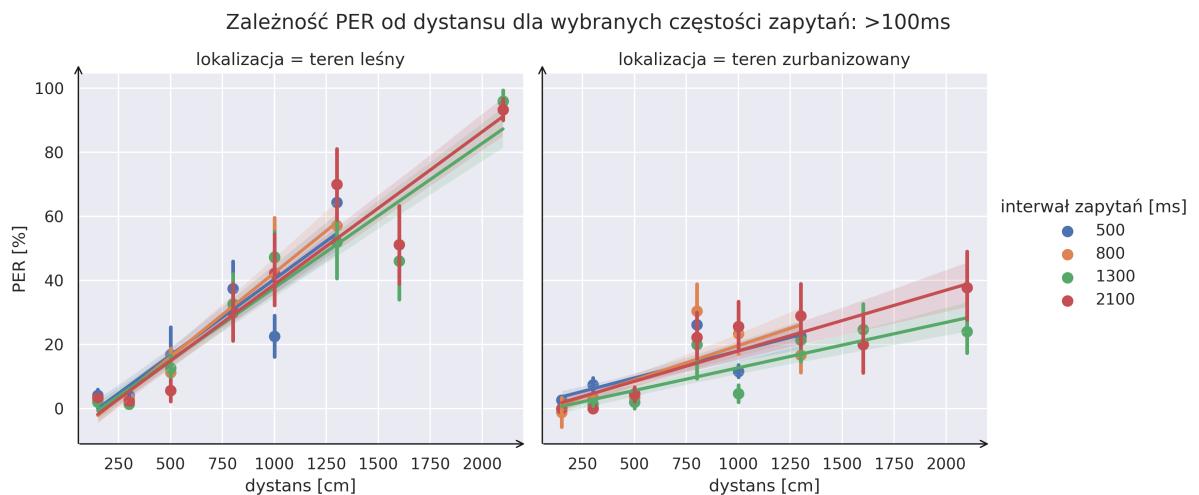


**Rysunek 17.** Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość  $\leq 100\text{ms}$  w wybranych środowiskach i liczbę badanych węzłów

Znając charakterystykę łączności dla okresów poniżej 100 milisekund, weryfikuje się pozostałe wybrane częstotliwości, zgodnie z podanymi wartościami 4.3.1. Rysunek 18 prezentuje pozostałe interwały w zależności od dystansu i wybranych środowisk bez rozróżnienia na liczbę węzłów w sieci.

Przeprowadzone pomiary w terenie leśnym wskazują charakterystykę połączenia zgodną z intuicyjnymi przewidywaniami. Na początkowym dystansie 150cm nie obserwuje się problemów z łącznością. Wszystkie wysłane pakiety zostały odebrane przez węzeł dalszy. Kolejny dystans wskazuje już na pewną utratę pakietów poniżej 20%. Prawdopodobnym czynnikiem jest pogoda lub ukształtowanie terenu leśnego. Co istotne, pomiary dla różnych interwałów odpowiadają są zbliżone. Sugerowałoby to brak wpływu częstotliwości na PER. Na pozostałych dystansach pomiarowych, wartości utraty pakietów są do siebie wzajemnie zbliżone osiągając swoje maksimum na dystansie 21m - blisko 100% zaginionych pakietów.

Charakterystyka łączności w terenie zurbanizowanym prezentuje się podobnie. Nie obserwuje się znaczającej utraty pakietów na względzie bliskich dystansach (150, 300 i 500cm). Wartość PER rośnie wraz ze wzrostem odległości pomiędzy węzłami osiągając w swoim szczycie wartość ok. 40%. Co istotne, linie interpolacyjne są do siebie zbliżone, ponownie sugerując brak korelacji pomiędzy częstotliwością wysyłania komunikatów a wartością PER.



**Rysunek 18.** Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwości  $>100\text{ms}$  w wybranych środowiskach

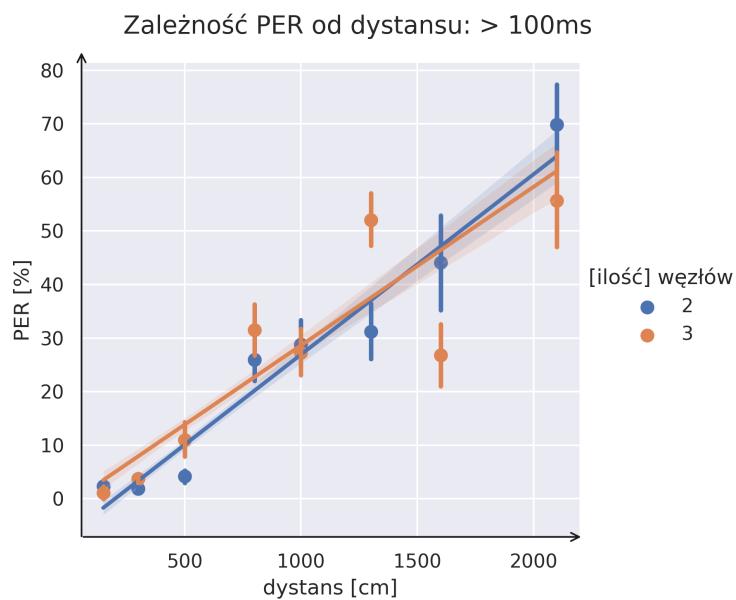
Zależność pomiędzy PER a częstotliwością odpytywań została zbadana wykorzystując narzędzia statystyczne. Traktując model liniowy, jak sugerują zaprezentowane wykresy, tworzone zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów wylicza się współczynnik determinacji dla następujących zmiennych niezależnych: dystans oraz PER. W kolejnym kroku uwzględnia się fakt wykorzystywania korelacji wielu zmiennych, dostosowując odpowiednio wartość.

Środowisko	$R^2$	$R^2_{dostosowany}$
Teren leśny	0.04958	0.04272
Teren zurbanizowany	0.04887	0.04200

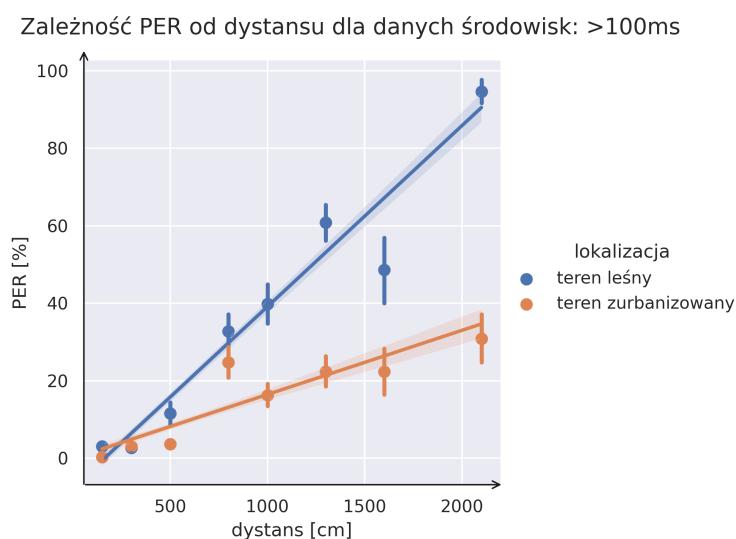
**Tablica 1.** Współczynnik determinacji dla zależności interwału zapytań od dystansu i PER w wybranych środowiskach

Ostatecznie, otrzymany współczynnik determinacji przyjmujący wartość  $R^2 = 0,04–0,05$ . Istnieje 4%-owy wpływ interwału zapytań o częstotliwościach większych niż 100 milisekund na ostateczny rezultat PER. Pozwala to wykluczyć ten czynnik wykluczyć z dalszych rozważań uznając go za marginalny.

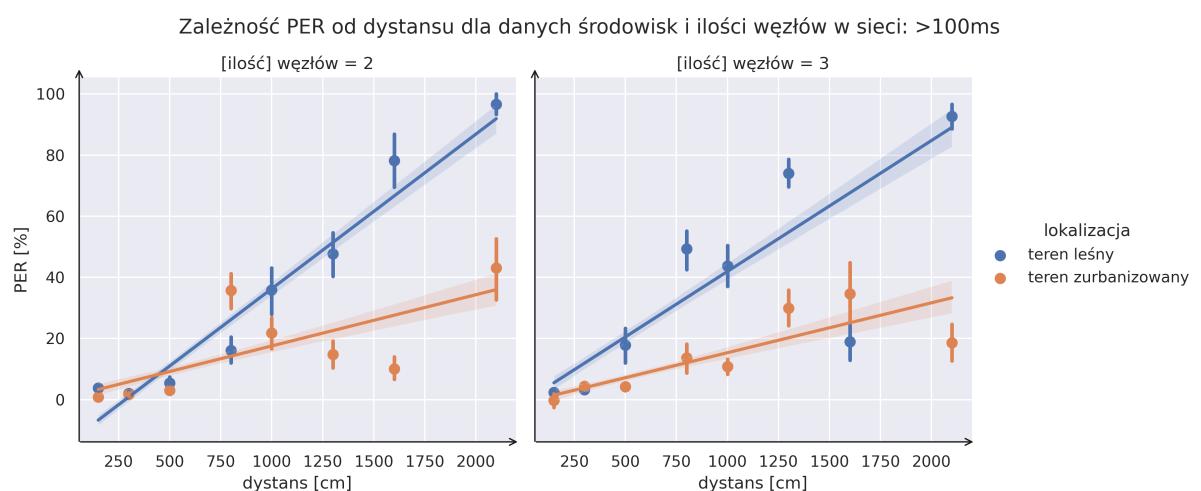
### 4.3.3 Zależność PER względem odległości między węzłami



Rysunek 19. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms dla różnej liczby węzłów



Rysunek 20. Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów



**Rysunek 21.** Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość >100ms w wybranych środowiskach i liczbę badanych węzłów



## Rozdział 5

### Podsumowanie

- Teoria: wiemy jak ma działać, ale jednak nie działa.
- Praktyka: działa, ale nie wiemy – dlaczego?
- Łączymy teorię z praktyką: nic nie działa i nie wiemy, dlaczego.

Więcej informacji na temat  $\text{\LaTeX}$ a:

- <<https://www.overleaf.com/learn>> – przystępny tutorial na stronie Overleaf,
- <<https://www.latex-project.org/>> – strona domowa projektu,
- <<https://www.tug.org/begin.html>> – dobry zbiór odnośników do innych materiałów.

Powodzenia!



# Bibliografia

- [1] *Bluetooth Protocol Stack - MATLAB & Simulink*. adr.: <https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-protocol-stack.html> (term. wiz. 15.05.2022).
- [2] Group, M. W., *Mesh Profile Bluetooth® Specification*, sty. 2019.
- [3] *P-NUCLEO-WB55 - Bluetooth 5 and 802.15.4 Nucleo Pack including USB dongle and Nucleo-64 with STM32WB55 MCUs, supports Arduino Uno V3 and ST morpho connectivity - STMicroelectronics*, en. adr.: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/p-nucleo-wb55.html> (term. wiz. 10.05.2022).
- [4] SA, H., *TCP/IP. Szkoła programowania*, pl, ISBN: 978-83-246-0293-3. adr.: [https://helion.pl/ksiazki/tcp-ip-szkola-programowania-heather-osterloh\\_tcpszp.htm](https://helion.pl/ksiazki/tcp-ip-szkola-programowania-heather-osterloh_tcpszp.htm) (term. wiz. 15.05.2022).
- [5] *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [6] *STM32CubeMonPwr - Graphical tool displaying on PC power data coming from X-NUCLEO-LPM01A* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemonpwr.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [7] *STM32CubeProg - STM32CubeProgrammer software for all STM32* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [8] *STM32CubeWB MCU Firmware Package*, original-date: 2019-04-19T13:27:35Z, maj 2022. adr.: <https://github.com/STMicroelectronics/STM32CubeWB> (term. wiz. 14.05.2022).
- [9] *STM32WB - Bluetooth, Wireless Microcontrollers (MCU)* - STMicroelectronics, 2022. adr.: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wb-series.html> (term. wiz. 14.05.2022).
- [10] STMicroelectronics, *UM2435 - Bluetooth® Low Energy and 802.15.4 Nucleo pack based on STM32WB Series microcontrollers*, 2019.
- [11] —, *PM0271 - STM32WB BLE stack programming guidelines*, grud. 2021. adr.: [https://www.st.com/resource/en/programming\\_manual/pm0271-stm32wb-ble-stack-programming-guidelines-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0271-stm32wb-ble-stack-programming-guidelines-stmicroelectronics.pdf).

## *Bibliografia*

---

- [12] *UM2243 - STM32 Nucleo expansion board for power consumption measurement*, mar. 2018.  
adr.: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2243-stm32-nucleo-expansion-board-for-power-consumption-measurement-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2243-stm32-nucleo-expansion-board-for-power-consumption-measurement-stmicroelectronics.pdf).
- [13] *X-NUCLEO-LPM01A - STM32 Power shield, Nucleo expansion board for power consumption measurement (UM2243) - STMicroelectronics*, en. adr.: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-lpm01a.html> (term. wiz. 10.05.2022).

# Wykaz skrótów i symboli

**API** Application Programming Interface 28

**BLE** Bluetooth Low Energy 16, 27

**BMS** Battery Management System 18

**CAD** Computer-aided Design 19

**FDM** Fused Deposition Modeling 19

**FFF** Fused Filament Fabrication 19

**ISM** Industrial, Scientific, Medical 30

**LL** Link Layer 28

**PCB** Printed Circuit Board 19, 20

**PER** Packet Error Rate 16, 27, 29, 32–37

**PLA** Polylactic Acid 19



# Spis rysunków

1	Zestaw uruchomieniowy P-NUCLEO-WB55. Źródło: [3] . . . . .	16
2	Zestaw pomiarowy X-NUCLEO-LPM01A. Źródło: [13] . . . . .	17
3	Odbiornik energii . . . . .	19
4	Model obudowy dla zestawu P-NUCLEO-WB55 . . . . .	20
5	Obudowa zestawu uruchomieniowego Nucleo wykonana w technologii druku 3D - realizacja . . . . .	20
6	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE i usługi Heart Rate . . . . .	23
7	Zestawienie zużycia prądu dla usługi Heart Rate w zależności od trybu działania . . . . .	24
8	Charakterystyka czasowa poboru prądu dla BLE Mesh i modelu Generic OnOff . . . . .	25
9	Zestawienie zużycia prądu dla BLE Mesh w zależności od trybu działania . . . . .	26
10	Porównanie średniego zużycia energii pomiędzy BT Low Energy HRT i BLE Mesh . . . . .	27
11	Model ISO OSI wraz i odpowiadające mu nazwy porcji danych. Źródło: [4] . . . . .	28
12	Zestawienie stosu BLE i modelu ISO OSI. Źródło: [1] . . . . .	28
13	Dystans pomiędzy węzłami dla sieci dwóch mikrokontrolerów . . . . .	30
14	Dystans pomiędzy węzłami dla sieci trzech mikrokontrolerów . . . . .	31
15	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ dla różnej liczby węzłów . . . . .	32
16	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów . . . . .	33
17	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $\leq 100\text{ms}$ w wybranych środowiskach i liczbę badanych węzłów . . . . .	34
18	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach . . . . .	35
19	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ dla różnej liczby węzłów . . . . .	36
20	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach bez rozróżnienia na liczbę węzłów . . . . .	36
21	Zależność PER od dystansu dla zapytań o częstotliwość $>100\text{ms}$ w wybranych środowiskach i liczbę badanych węzłów . . . . .	37



# **Spis tabelic**

1	Współczynnik determinacji dla zależności interwału zapytań od dystansu i PER w wybranych środowiskach . . . . .	35
---	---	----



# **Spis załączników**

1	Dowód próżni doskonałej .....	51
2	Dowód zera bezwzględnego .....	53
3	Dowód czasu zatrzymanego .....	55
4	Dowód nieskończoności urojonej .....	57



# Załącznik 1

## Dowód próżni doskonałej

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.



# Załącznik 2

## Dowód zera bezwzględnego

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.



# Załącznik 3

## Dowód czasu zatrzymanego

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.



# Załącznik 4

## Dowód nieskończoności urojonej

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetuer at, consectetuer sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.