

The screenshot shows the BLE Device Monitor application (version 2.5.0) connected to a CC2650 SensorTag. The interface displays several sensor readings:

- IR Temperature:** IR local temp. 34.72°C, IR target temp. 16.72°C.
- Humidity:** Humidity 62.81%RH, Humidity temp. 22.21°C.
- Accelerometer:** Accel X 91, Accel Y 260, Accel Z 1080.
- Pressure:** Pressure temp. 25.06°C, Pressure 1009.58 hPa.
- Gyroscope:** Gyro X -0.30 deg/s, Gyro Y 0.36 deg/s, Gyro Z 0.11 deg/s.
- Magnetometer:** Mag X -42.00 uT, Mag Y -515.87 uT, Mag Z -73.98 uT.
- Light sensor:** Light 1.61 Lux (Texas Instruments OPT3001).

The interface also includes an Event Log, BLE Network list, and various control buttons like Scan, Disconnect, and Autoconnect.

# Systemy dla Internetu Rzeczy (7)

## Bluetooth Low Energy

Podstawą działania węzłów Internetu rzeczy jest sprawna komunikacja bezprzewodowa przy bardzo ograniczonym poborze mocy. Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku układu CC2650 SensorTag firmy Texas Instruments. Dlatego producent przygotował specjalną wersję systemu operacyjnego czasu rzeczywistego TI-RTOS ściśle powiązaną ze stosem komunikacyjnym BLE.

W dotychczasowych odcinkach kursu „Systemy dla Internetu Rzeczy” został omówiony zestaw CC2650 SensorTag [1], jego użytkowanie [2] oraz moduły rozszerzeń Debug DevPack, Display DevPack (LCD screen) i LED Audio DevPack [3]. Moduł CC1310 LaunchPad został omówiony w artykule [4]. W dwóch ostatnich częściach kursu przedstawiono system operacyjny czasu rzeczywistego TI-RTOS dla procesorów z serii CC13xx/CC26xx [5, 6]. Praktyczne ćwiczenia dotyczyły zestawu CC2650 SensorTag.

### Stos BLE-Stack 2.2.1

Specyfikacje standaryzacyjne dla komunikacji Bluetooth są przygotowywane przez grupę SIG [16]. Obecnie najbardziej rozpoznana jest specyfikacja Bluetooth v4.2. Jest już udostępniona specyfikacja Bluetooth 5.

BLE-Stack 2.2.1 jest pakietem programowym typu SDK (Software Development Kit) [7]. Stos BLE jest silnie zintegrowany z systemem operacyjnym TI-RTOS (TI Real-Time Operating System). Stos jest przeznaczony dla procesorów rodziny CC26xx (układy CC2640 i CC2650) oraz rodziny CC13xx (układ CC1350). Obsługuje pełny standard specyfikacji Bluetooth v4.2. Obejmuje to też kompatybilność z wersją v4.1. Jest dostarczany wraz pełnym pakietem programowym

bez opłat dla wykorzystania z układami TI. Istnieje też osobna wersja stosu przeznaczona dla procesora CC2540 starszej generacji.

Pakiet programowy zawiera przykładowe projekty przeznaczone dla różnych modułów sprzętowych: CC2650 LaunchPad, CC1350 LaunchPad, CC2650 SensorTag, CC1350 SensorTag oraz innych. Układ scalony CC2650 jest kompatybilny z układem CC2640 i realizuje dokładnie te same funkcjonalności. Dlatego konfiguracje programowe dla CC2640 można bezpośrednio stosować do układu CC2650.

### Dokumentacja

Ogólne informacje na temat BLE w portalu TI są zgrupowane na stronie Wireless Connectivity [13]. Dokument *CC2640/CC2650 Bluetooth low energy Software Developer's Guide, SWRU393* [8] zawiera pełne omówienie większości aspektów dotyczących standardu Bluetooth, organizacji komunikacji, budowy i organizacji stosu komunikacyjnego, budowy i organizacji systemu TI-RTOS w wersji dedykowanej dla BLE oraz bardzo wiele szczegółowych zagadnień. Jest to podstawowe źródło wiedzy i trzeba koniecznie zapoznać się co najmniej z pierwszymi trzema rozdziałami oraz z rozdziałem piątym.

Opis organizacji danych transmitowanych przez BLE z zestawu CC2650STK jest zamieszczony na stronie *CC2650 SensorTag User's Guide* [15].

*BLE Device Monitor* [10] jest aplikacją dla systemu Windows do obsługi transmisji w formacie BLE. Aplikacja wymaga dołączenia do komputera zestawu CC2650LP lub CC2650STK [9] z pracującą aplikacją *BLE HostTest Project* [14]. Monitor umożliwia wgląd w parametry komunikacji oraz w przesyłane dane. Bardzo rozbudowane jest wsparcie dla podładu danych przesyłanych przez aplikację „Demo” pracującą na CC2650STK.

Na portalu społecznościowym *TI E2E Community* znajduje się bardzo przydatna strona *CC2640/CC2650 Getting Started and FAQ* [11]. Jest ona często aktualizowana i zawiera odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania.

## Warsztaty SimpleLink Academy

Bardzo ciekawą pomocą dla każdego, kto zaczyna pracować z procesorami rodziny CC13xx/CC26xx, są ćwiczenia warsztatowe *SimpleLink Academy* [12]. Dostępnych jest wiele ćwiczeń z dokładnym opisem oraz kodem źródłowym. Dla wielu ćwiczeń jest udostępniony zapis wideo.

## Ćwiczenie Bluetooth Low Energy Fundamentals

Prezentowane obecnie ćwiczenie jest praktycznym (krok po kroku) wprowadzeniem do używania stosu TI BLE-Stack. Jest ono wzorowane na ćwiczeniu *Bluetooth Low Energy Fundamentals* w portalu *SimpleLink Academy* [12]. Zostały jednak wprowadzone liczne zmiany i rozszerzenia.

## Wymagania sprzętowe

Do pracy są potrzebne:

- Komputer PC z systemem operacyjnym Win 7 (lub nowszym).
- Zestaw CC2650 SensorTag z dołączonym modułem rozszerzeń Debug DevPack. Połączony z komputerem kablem USB-A USB-Micro.
- Drugi moduł sprzętowy z obsługą BLE, połączony z komputerem kablem USB-A USB-Micro. Może to być:
  - Zestaw CC2650 SensorTag z dołączonym modułem rozszerzeń Debug DevPack.
  - Zestaw CC1350 SensorTag z dołączonym modułem rozszerzeń Debug DevPack.
  - Moduł CC2650 Launchad.
  - Moduł CC1350 Launchad.

## Wymagania programowe

- Zainstalowany program CCS v7 (Version: 7.0.0.00043 lub nowszy).
- Zainstalowany program BLE-STACK V2.2.1 (Support for CC2640/CC2650) [7]. Instalowane są:
  - Stos BLE w ścieżce C:\ti\simplelink\ble\_sdk\_2\_02\_01\_18.
  - Biblioteki systemu operacyjnego TI-RTOS w ścieżce C:\ti\tirtos\_cc13xx\_cc26xx\_2\_20\_01\_08.
  - Biblioteki zewnętrzne tego systemu w ścieżce C:\ti\xdctools\_3\_32\_00\_06\_core.
- Zainstalowane źródła pakietu *SimpleLink Academy v1.11* znajdujących się w ścieżce c:\ti\simplelink\_academy\_01\_11\_00\_0000.
- TI BLE Device Monitor v2.5.0 [10].

Istotna jest powyższa kolejność instalowania oprogramowania. Po zainstalowaniu każdego pakietu należy uruchomić CCSv7. Pozwala to na zbudowanie przez CCSv7 bazy projektów przykładowych dostarczanych przez pakiet.

## Zadanie 1 – Uruchamianie projektu HostTest

Do komunikacji z węzłami końcowymi sieci Bluetooth Low Energy potrzebne jest w sieci jedno urządzenie pracujące jako urządzenie

centralne (Central). Może to być zestaw CC2650 SensorTag z zaprogramowaną aplikacją HostTest. Aplikacja *TI BLE Device Monitor* pracująca na komputerze PC komunikuje się poprzez łącze UART z aplikacją HostTest pracującą na zestawie CC2650 SensorTag. Umożliwia to użytkownikowi aplikacji na wywołanie większości funkcji GAP, GATT oraz ATT stosu BLE.

Nie ma projektu HostTest gotowego do zastosowania bezpośredniego dla zestawu CC2650 SensorTag. Jednak można importować projekt HostTest przygotowany dla zestawu CC2650-LAUNCHXL i adaptować go dla zestawu CC2650 SensorTag [14]. Aplikacja składa się z dwóch połączonych projektów: stosu BLE (stack) oraz projektu użytkownika (app). Obie muszą być zaprogramowane w odpowiedniej kolejności (najpierw stack) do zestawu CC2650 SensorTag.

## Uruchamianie CCSv7

1. Uruchomić program CCSv7 klikając dwukrotnie na jego ikonę.
2. W oknie *Workspace Launcher* pozostaw (lub wpisz) ścieżkę do folderu roboczego, np. <C:\home\_dir\work\_ART7>. Kliknij OK.
3. Obserwuj informacje na pasku w prawym dolnym rogu. Dotyczą one ładowania modułów środowiska Eclipse oraz sprawdzania dostępności aktualizacji. Najlepiej zaczekać na zakończenie tych prac.
4. Zamknij okno *Updates Available* (jeśli zostanie wyświetlone) lub wykonaj aktualizację.

## Ładowanie projektu host\_test\_cc2650lp\_app

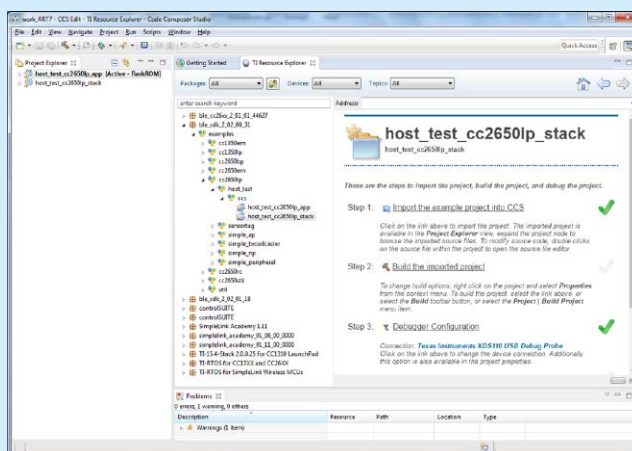
5. Otwórz okno *Resource Explorer* z menu *View* → *Resource Explorer Classic*.
6. W zakładce *TI Resource Explorer* rozwiń listę `ble_sdk_2_02_01_18` → `examples` → `cc2650lp` → `host_test` → `ccs`
7. Kliknij na linię `host_test_cc2650lp_app`.

Po prawej stronie zostanie wyświetlona instrukcja jak postępować w czterech krokach (rysunek 1).

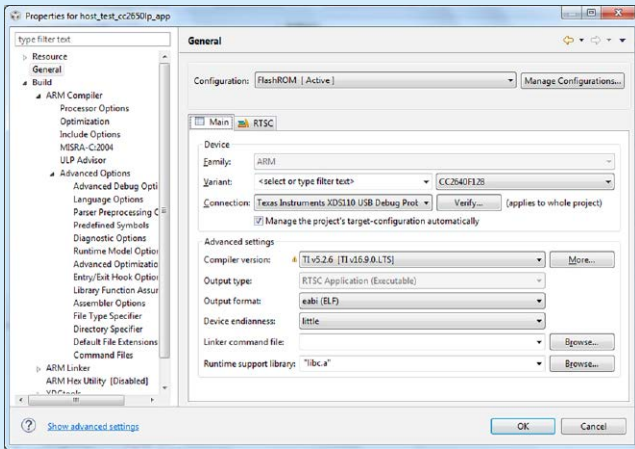
8. Kliknij na odnośnik kroku 1. Po załadowaniu projektu zostanie pokazana w oknie *Project Explorer* linia projektu `host_test_cc2650lp_app`.
9. Kliknij na zakładkę *TI Resource Explorer*. Zielony znaczek ✓ pojawi się na prawo od odnośnika kroku 1. Jeśli znaczek się nie będzie wyświetlony, należy kliknąć w zakładce *TI Resource Explorer* na linię `CC2650 SensorTag`.

## Ładowanie projektu host\_test\_cc2650lp\_stack

10. Kliknij na linię `host_test_cc2650lp_stack`. Po prawej stronie zostanie wyświetlona instrukcja jak postępować w czterech krokach.



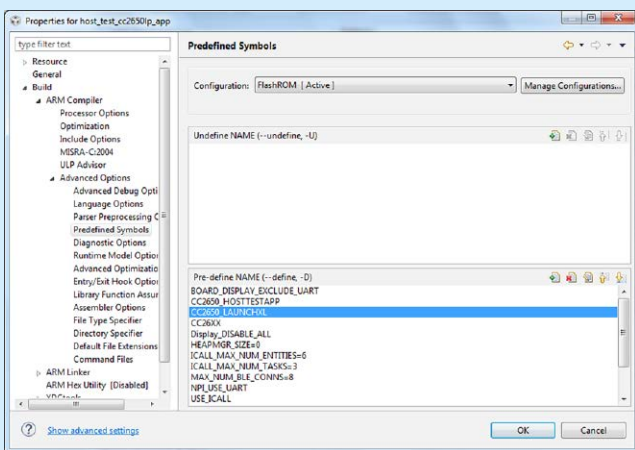
Rysunek 1. Ładowanie projektu „host\_test\_cc2650lp\_stack”



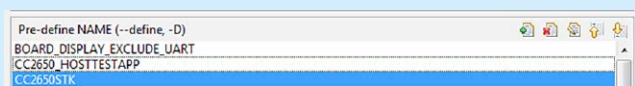
**Rysunek 2. Okno właściwości dla projektu "host\_test\_cc2650lp\_app"**



**Rysunek 3. Wybór najnowszej wersji kompilatora**



**Rysunek 4. Okno predefiniowanych symboli projektu "host\_test\_cc2650lp\_app"**



**Rysunek 5. Okno symboli po modyfikacji**

11. Kliknij na odnośnik kroku 1. Po załadowaniu projektu zostanie pokazana w oknie *Project Explorer* linia projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack** (rys. 1).
12. Kliknij na zakładkę *TI Resource Explorer*. Zielony znaczek ✓ pojawi się na prawo od odnośnika kroku 1. Jeśli znaczek się nie pojawi należy kliknąć w zakładce *TI Resource Explorer* na linię **CC2650 SensorTag**.

### Modyfikowanie projektu **host\_test\_cc2650lp\_app**

13. W oknie *Project Explorer* kliknij prawym przyciskiem myszki na linię projektu **host\_test\_cc2650lp\_app** i z podręcznego menu wybierz *Properties* (rysunek 2).
14. Na liście po lewej stronie kliknij na *General*. Na zakładce *Main* rozwiń listę *Compiler version* i wybierz najnowszą wersję kompilatora (rysunek 3). Kliknij *OK*.
15. Na liście po lewej stronie wybierz *Build* → *ARM Compiler* → *Advanced Options* → *Predefined Symbols* (rysunek 4).
16. Znajdź linię zdefiniowania symbolu **CC2650\_LAUNCHXL**.

17. Dwukliknij na nią, co spowoduje otworenie do edycji.
18. Zamień nazwę symbolu na **CC2650STK**.
19. Kliknij *OK*.
20. Sprawdź poprawność wykonania zamiany (rysunek 5).

### Modyfikacja projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack**

21. W oknie *Project Explorer* kliknij prawym przyciskiem myszki na linię projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack** i z podręcznego menu wybierz *Properties* (rys. 2).
22. Na liście po lewej stronie okna kliknij na *General*. Na zakładce *Main* rozwiń listę *Compiler version* i wybierz najnowszą wersję kompilatora. Kliknij *OK*.

### Krok 2 Zbuduj projekt "host\_test\_cc2650lp\_app"

23. W celu zbudowania projektu wybierz z menu *Project* → *Clean*.
  24. W oknie *Clean* kliknij na *OK*.
- Pojawią się okna „Console” i „Problems”. Podczas budowania postęp wykonania jest pokazywany w oknie „Progress Information” oraz w oknie „Console”.

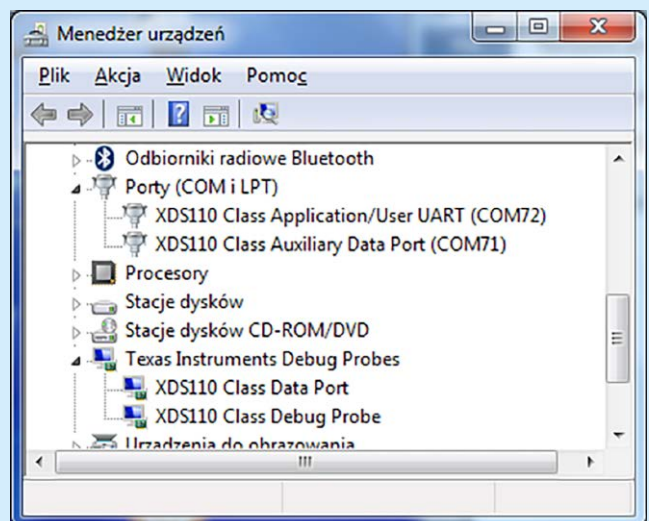
Na końcu w oknie „Console” zostanie pokazana informacja o pomyślnym wygenerowaniu pliku kodu. Zielony znaczek ✓ zostanie wyświetlony na prawo od odnośnika kroku.

### Dołączenie pierwszego zestawu **CC2650 SensorTag**

25. Do zestawu **CC2650 SensorTag** dołącz moduł rozszerzeń *Debug DevPack* (dokładniejszy opis w [2]). Połącz pierwszy **CC2650STK** z komputerem PC kablem **USB-A USB-Micro**. Na płytce modułu *Debug DevPack* zaczyna świecić dioda LED, co sygnalizuje, że moduł jest gotowy do pracy.
26. Otwórz *Menedżer Urządzeń* i czekaj aż zostaną zainstalowane wszystkie drajwery sprzętowe (rysunek 6). Port szeregowy *Application/User UART (COMxx)* jest używany do wysyłania informacji z aplikacji pracującej na pierwszym zestawie **CC2650 SensorTag**.
27. Zapisz numer tego portu. Będzie później potrzebny.

### Krok 3 Wybierz typ emulatora sprzętowego

28. W projekcie już został wcześniej zdefiniowany typ emulatora. Zielony znaczek przy odnośniku kroku 3 jest ustawiony (rys. 4). Ale trzeba sprawdzić poniżej odnośnika czy jest poprawnie wybrany typ emulatora: „*Texas Instruments*”



**Rysunek 6. Stan po zainstalowaniu drajwerów XDS110**



XDS110 USB Debug Probe”. I w razie niegodności należy zmienić go na prawidłowy.

29. W oknie “Project Explorer” rozwiń drzewo projektu **tirtos\_lab1\_cc2650stk** oraz pozycję **targetConfigs** node. Został zdefiniowany plik CC2640F128.ccxml oraz ustawiony jako [Active/Default].

### Zaprogramowanie zestawu CC2650 SensorTag

Najpierw do pamięci Flash zestawu CC2650 SensorTag musi być wpisany kod projektu stosu BLE (stack) a dopiero potem kod projektu użytkownika (app).

**Uwaga!** Przy próbie debugowania może zostać wyświetlona informacja o konieczności aktualizacji oprogramowania dołączonego emulatora XDS110 (moduł rozszerzeń Debug DevPack). Należy to koniecznie wykonać. Dokładny opis postępowania jest zamieszczony w ramce „Aktualizowanie oprogramowania firmowego XDS110”.

Po zakończeniu aktualizacji można bez problemu ponowić próbę debugowania.

### Krok 4A Debuguj projekt **host\_test\_cc2650lp\_stack**

30. W oknie *Project Explorer* kliknij na linię projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack**.
- Uwaga: Należy wybrać projekt stosu (STACK) a nie aplikacji (APP).
31. Debuguj projekt **host\_test\_cc2650lp\_stack**. Kliknij na przycisk *Debug*.
32. Czekaj aż wykonywanie projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack** zostanie uruchomione lub zawieszono. Sprawdź to w oknie *Debug*.
33. W perspektywie *CCS Debug* zakończ sesję debugową (terminate) projektu **host\_test\_cc2650lp\_stack**. Użyj czerwonej, kwadratowej ikonki.
34. Czekaj aż w oknie aplikacji zostanie przełączony widok na okno perspektywy *CCS Edit*.

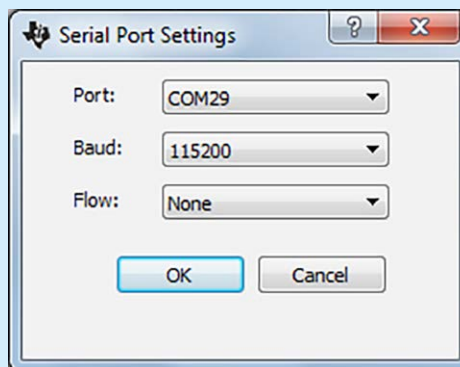
### Krok 4B Debuguj projekt **host\_test\_cc2650lp\_app**

35. W oknie *Project Explorer* kliknij na linię projektu **host\_test\_cc2650lp\_app**.
- Uwaga: Należy wybrać projekt aplikacji (APP) a nie stosu (STACK).
36. Debuguj projekt **host\_test\_cc2650lp\_app**. Kliknij na przycisk *Debug*.
37. Czekaj aż kursor w oknie edycji zostanie umieszczony w pierwszej linii funkcji *main()*.
38. W perspektywie *CCS Debug* zakończ sesję debugową (terminate) projektu **host\_test\_cc2650lp\_app**. Użyj czerwonej, kwadratowej ikonki.
39. Czekaj aż w oknie aplikacji zostanie przełączony widok na okno perspektywy *CCS Edit*.
40. Zamknij CCSv7.

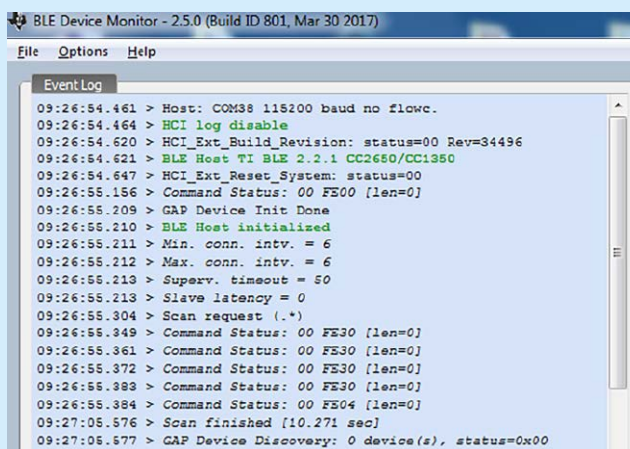
## Zadanie 2 – Komunikacja BLE

Texas Instruments udostępnia kilka aplikacji dla komputera PC, które komunikują się poprzez port szeregowy UART ze specjalnym oprogramowaniem wpisywanym do układu procesorowego CC2650. Polecenia portu szeregowego są zgodne ze standardem HCI zdefiniowanym przez konsorcjum Bluetooth SIG. Pozwalają one dodatkowo na dostęp do warstwy Host z GATT, GAP i Security Manager.

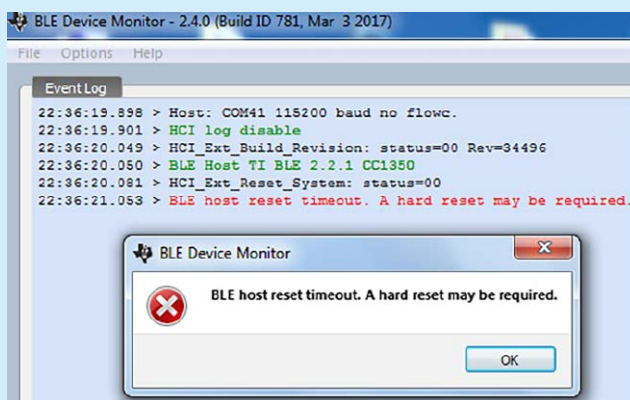
41. Dołącz **pierwszy** zestaw CC2650STK z zaprogramowanym projektem **HostTest** do komputera PC kablem USB-A USB-Micro.
42. W *Menedżerze Urządzeń* sprawdź stan i poczekaj aż zostaną zainstalowane wszystkie drajwery sprzętowe. Czasami ponowne aktywowanie drajwerów trwa wyraźnie dłużej niż zwykle.



Rysunek 7. Okno ustawiania parametrów komunikacji



Rysunek 8. Uruchomienie komunikacji z aplikacją **HostTest**



Rysunek 9. Wymaganie restartu sprzętowego

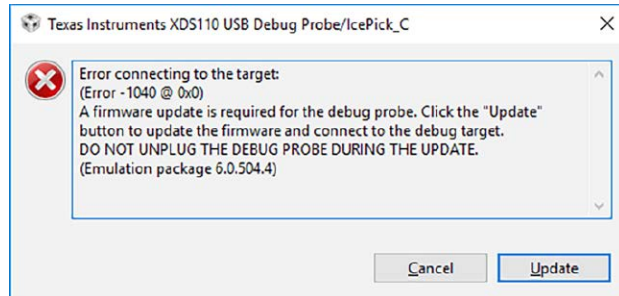
A próby używania portu przed ustabilizowaniem sytuacji kończą się zablokowaniem komunikacji.

### Wystartowanie aplikacji **TI BLE Device Monitor**

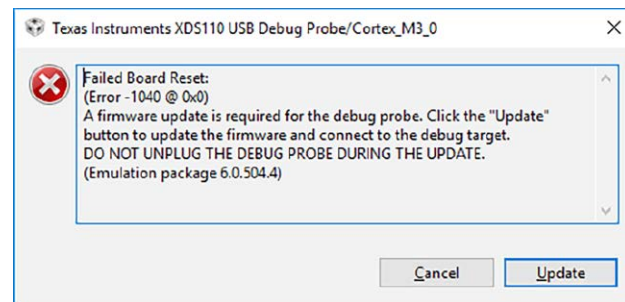
43. Uruchom aplikację **TI BLE Device Monitor Version 2.5.0**. Przy pierwszym uruchomieniu aplikacji pokazuje się okno informujące o błędnym numerze portu szeregowego. Nie jest to istotne i należy kliknąć *OK*.
44. Z menu *Options* → *Serial port* otwórz okno *SerialPort Settings* (rysunek 7).
45. W *Menedżerze urządzeń* sprawdź numer portu szeregowego Application/User UART (COMxx) pierwszego zestawu CC2650 SensorTag.
46. Rozwiń listę *Port* i wybierz port COMxx pierwszego zestawu CC2650 SensorTag.
47. Pozostaw ustawienia parametrów komunikacji: 115200 baud oraz *None*.

## Aktualizowanie oprogramowania firmowego XDS110

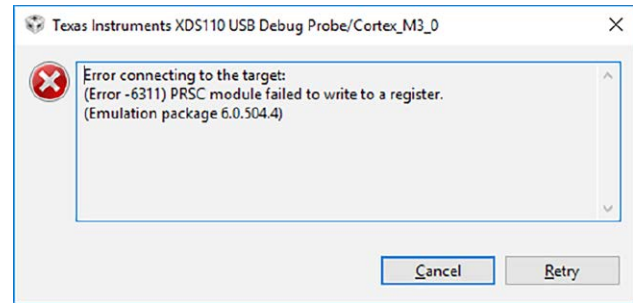
Fabrycznie dostarczony emulator XDS110 ma wpisane stare oprogramowanie firmowe. Dlatego przy jego pierwszym użyciu z oprogramowaniem narzędziowym często zostaje wyświetlona informacja o konieczności aktualizacji tego oprogramowania. Należy koniecznie wykonać aktualizację. Może też to być zmiana na nowszą wersję oprogramowania. Aktualizacja jest dostępna w programach CCSv7, BLE Device Monitor oraz SmartRF Flash Programmer. W CCS7 występuje podczas próby debugowania.



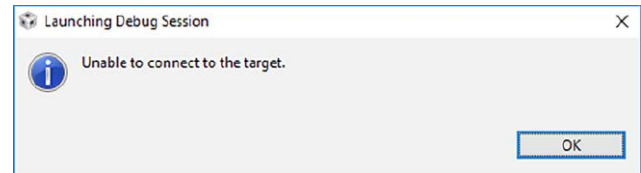
Kliknij **Update**. Zostanie wyświetlone kolejne okno.



W drugim oknie kliknij **Update**.  
Teraz w trzecim oknie aktualizacji kliknij **Cancel**.



W czwartym oknie aktualizacji kliknij **OK**.



Jeżeli aktualizacji została przeprowadzona w CCS7 podczas próby debugowania to środowisko powraca teraz automatycznie do stanu sprzed tej próby. Ponownie pokazywana jest perspektywa *CCS Edit*. Należy teraz koniecznie przeprowadzić poniżej opisaną procedurę **Reset** i dopiero potem można ponowić próbę debugowania (już bez problemów).

### Procedura Reset

Aby zmiany zostały uwzględnione wymagane jest teraz wykonanie procedury Resetu sprzętowego. Pominięcie tego kroku może spowodować zablokowanie komunikacji poprzez porty szeregowo-pomiedzy zestawem CC2650STK a komputerem PC. Odłącz zestaw CC2650STK od komputera kablem USB-A USB-Micro.

Ponownie dołącz zestaw CC2650STK do komputera kablem USB-A USB-Micro.

Otwórz Menedżer Urządzeń i czekaj aż zostaną zainstalowane wszystkie drajwery sprzętowe.

48. Kliknij **OK**.

Aplikacja automatycznie rozpoczyna poszukiwanie dołączonego urządzenia BLE. W oknie *Event Log* jest pokazywana komunikacja pomiędzy aplikacją *BLE Device Monitor* oraz aplikacją *HostTest* (rysunek 8). Domyślnie aplikacja rozpoczyna wykonanie skanowania urządzeń BLE. Na razie nie został wykryty żaden węzeł standardu BLE. Często jednak zostają wykryte inne urządzenia standardu BLE, np. smartfony.

Zasami aplikacja *BLE Device Monitor* sygnalizuje konieczność wykonania procedury Resetu sprzętowego (rysunek 9). Dotyczy to raczej modułu rozszerzeń *Debug DevPack* niż samego zestawu CC2650STK. Są one jednak połączone wspólnym zasilaniem.

Należy wtedy odłączyć zestaw CC2650STK z modułem rozszerzeń *Debug DevPack* od komputera kablem USB-A USB-Micro i ponownie podłączyć. W Menedżerze urządzeń sprawdź czy zostaną zainstalowane wszystkie drajwery sprzętowe.

## Drugi zestaw CC2650STK

Do skomunikowania z aplikacją *BLE Device Monitor* potrzebny jest drugi zestaw BLE.

Najlepiej zastosować zestaw CC2650STK z fabrycznie zaprogramowanym programem o wdzięcznej nazwie „DEMO”. Sposób wpisania programu Demo do zestawu CC2650STK jest opisany w [2].

49. Dołącz kablem USB-A USB-Micro do komputera PC drugi zestaw CC2650STK z fabrycznie zaprogramowanym programem „DEMO” [2].

Właściwie to potrzebne jest tylko zasilanie zestawu CC2650STK. Dlatego można zastosować sam zestaw CC2650STK zasilany

z wewnętrznej baterii CR2032 [3]. Lub podłączyć do gniazdka USB-Micro standardowy power-bank.

Zestaw CC2650STK z fabrycznym programem po dołączeniu zasilania wchodzi w stan rozgłaszania. Dioda LED błyska co 1 sekundę. Jeśli w ciągu ok 30-120 sekund nie zostanie zrealizowane połączenie to zestaw CC2650STK przechodzi do stanu uśpienia. Można go ponownie wybudzić do stanu rozgłaszania poprzez naciśnięcie przycisku po lewej stronie obudowy [2].

## Skanowanie układów BLE

50. W oknie *BLE Network* przyciśnij przycisk *Scan*.

Po 12 sekundach rezultat skanowania jest pokazywany w tym oknie.

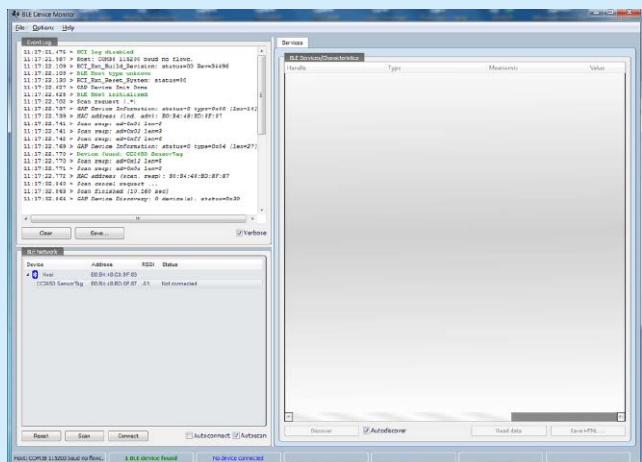
Jeśli w pobliżu nie ma innych układów BLE, to widok będzie podobny jak na **rysunku 10**. Widoczne są dwa układy BLE. Układ o nazwie *Host*, to pierwszy zestaw CC2650STK z zaprogramowanym projektem *HostTest*. W kolumnie *Address* pokazywany jest jego pełny adres MAC. Układ o nazwie *CC2650 SensorTag*, to drugi zestaw CC2650STK z fabrycznie zaprogramowanym programem „DEMO”. W kolumnie *RSSI* pokazywany jest poziom odbieranego sygnału radiowego w momencie skanowania.

## Dołączanie układu BLE

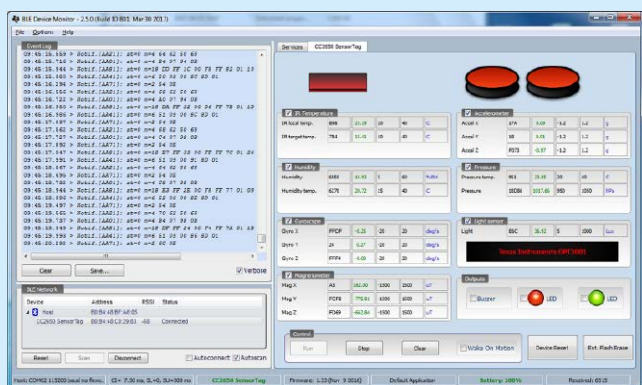
51. W oknie *BLE Network* kliknij na linię *CC2650 SensorTag* a następnie na przycisk *Connect*.

Stan zestawu CC2650STK w oknie *BLE Network* zmienia się na *Connected*. W prawym panelu okna aplikacji *BLE Device Monitor* pokazywana jest zakładka *CC2650 SensorTag* (rysunek 11). W przystępny sposób graficzny udostępnia ona rezultaty





**Rysunek 10. Wykryte układy BLE**

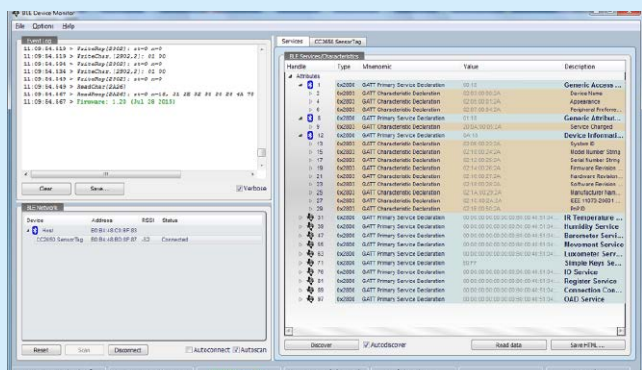


**Rysunek 11. Widok po pierwszym połączeniu z zestawem CC2650 SensorTag**

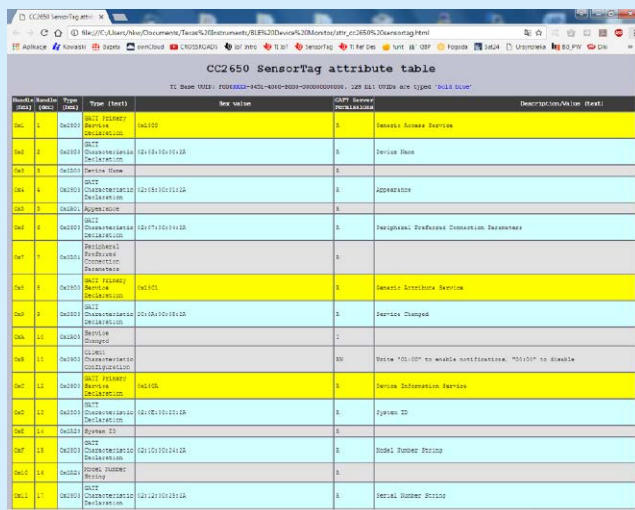
pomiarów wartości odczytów czujników zestawu CC2650 SensorTag. Po kliknięciu na przycisk Run cyklicznie dane są odczytywane z zestawu CC2650STK i pokazywane w polach tabelki. Możliwe jest też zaświecenie/zgaszenie diod LED oraz włączenie/wyłączenie brzęczyka.

### Zadanie 3 – Nawigowanie po serwisach

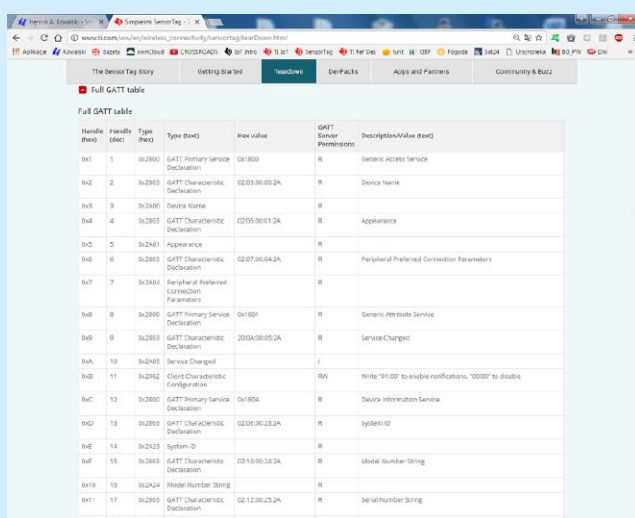
GATT (Generic Attribute Profile) organizuje dane przechowywane i przesyłane przez BLE i określa format danych przechowywanych na serwerze GATT [17]. Przesyłane atrybuty są w GATT formowane na serwisy i charakterystyki. Każdy serwis może zawierać jedną lub kilka charakterystyk. Z kolei każda charakterystyka zawiera pojedynczą wartość oraz dowolną liczbę deskryptorów opisujących tę wartość. Określony zestaw serwisów, określających minimalny zakres przypadków użycia danego urządzenia pozwalających wypełnić jego funkcje, tworzy profil urządzenia [17].



**Rysunek 12. Tablica serwisów GATT dla programu „Demo” zestawu CC2650 SensorTag**



**Rysunek 13. Zapisana tablica atrybutów dla zestawu CC2650 SensorTag**



**Rysunek 14. Pełna tablica atrybutów GATT dla zestawu CC2650 SensorTag**

52. Kliknij na zakładkę *Services*. Na tej zakładce w polu *BLE Services/Characteristics* pokazywana jest pełna informacja udostępnią poprzez łączę BLE przez zestaw CC2650 SensorTag (rysunek 12).
53. Kliknij na przycisk *Read data*. Pełny komplet danych zostanie ponownie przesłany z zestawu CC2650 SensorTag.
54. Kliknij na przycisk *Save HTML*. Pełny komplet aktualnych danych zostanie zapisany do pliku *attr\_cc2650\_sensortag.html* (rysunek 13).

Pełna tablica atrybutów (z opisami) dla zestawu CC2650 SensorTag jest udostępniona na stronie [sensortag2015](http://sensortag2015.com) [18]. Należy wybrać zakładkę *TearDown*, przewinąć na dół okna i rozwinąć pozycję *GATT Attribute Table* (rysunek 14).

### Obsługa wejścia – wyjścia (IO)

GAP, GATT, oraz Device Information Service są zgodne z oficjalnym profilem SIG [16]. Profil czujników jest profilem użytkownika ze 128 bitowym unikalnym UUID. Bazyowy identyfikator Texas Instruments jest zdefiniowany jako *F0000000-0451-4000-B000-000000000000*. Wszystkie czujniki używają pełnego 128-bitowego UUID. Ze względów praktycznych w dokumentacji pokazywane jest tylko indywidulane pole 16-bitowe (i oznaczane \*). Przykładowo *0xAA01\** jest mapowane jako *F000AA01-0451-4000-B000-000000000000*. Jedyna informacja

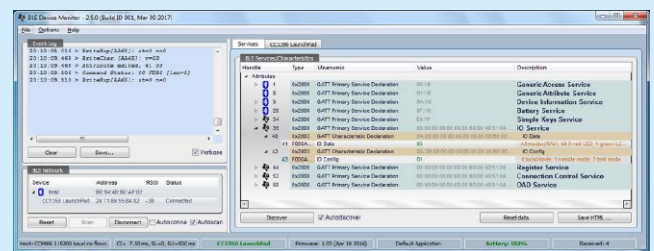
**Literatura**

- Systemy dla Internetu Rzeczy (1): Zestaw CC2650 SensorTag, Elektronika Praktyczna, 12/2016
- Systemy dla Internetu Rzeczy (2): Użytkowanie zestawu CC2650 SensorTag, Elektronika Praktyczna, 1/2017
- Systemy dla Internetu Rzeczy (3): Moduły rozszerzeń DevPack dla zestawu SensorTag, Elektronika Praktyczna, 2/2017
- Systemy dla Internetu Rzeczy (4): Zestaw CC1310 LaunchPad, Elektronika Praktyczna, 3/2017
- Systemy dla Internetu Rzeczy (5): System operacyjny czasu rzeczywistego TI-RTOS – pierwszy program, Elektronika Praktyczna, 4/2017
- Systemy dla Internetu Rzeczy (6): System operacyjny czasu rzeczywistego TI-RTOS – zadania i przerwania, Elektronika Praktyczna, 5/2017
- BLE-STACK V2.2.1 (Support for CC2640/CC2650) v2.2.1, 28-OCT-2016, <https://goo.gl/xT19tI>
- CC2640/CC2650 Bluetooth low energy Software Developer's Guide (SWRU393D.pdf) 15 October 2016,

- <https://goo.gl/gfY43R>
- BLE Device Monitor User Guide (TI WIKI), 7 April 2017, <https://goo.gl/edY9Wq>
- TI BLE Device Monitor (<https://goo.gl/WAAdL6>)
- CC2640/CC2650 Getting Started and FAQ, 2017 Mar 10, <https://goo.gl/vYSEPF>
- SimpleLink Academy (v1.11 - November 4th 2016), <https://goo.gl/oGYzeE>
- Wireless Connectivity, Bluetooth Low Energy (BLE), <https://goo.gl/u4jdj5>
- BLE HostTest Project, <https://goo.gl/TTzq1H>
- CC2650 SensorTag User's Guide, 31 May 2017, <https://goo.gl/MUUKUq>
- Bluetooth Core Specification, Bluetooth Special Interest Group (SIG), <https://goo.gl/FVvin9>
- Dominika Rogala, System do bezkontaktowego pomiaru temperatury ciała człowieka, <https://goo.gl/jUEzZe>
- IoT made easy, Teardown, Full GATT table, <https://goo.gl/2cnlmy>



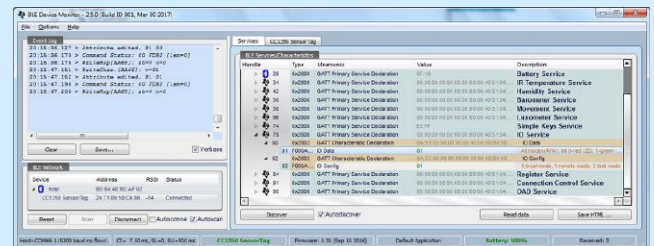
**Rysunek 15. CC2650 SensorTag – serwisy IO**



**Rysunek 17. CC1350 LaunchPad – serwisy IO**



**Rysunek 16. CC2650 LaunchPad – serwisy IO**



**Rysunek 18. CC1350 SensorTag – serwisy IO**

przekazywana od węzła sieci to uchwyt (Handle). Jest on dynamiczną formą krótkiego adresowania atrybutów (Attribute) z wartością (Value) oraz typem (Type), który mówi jak interpretować wartość. Razem te trzy elementy tworzą atrybut. Każda linia pokazywana w oknie *BLE Services/Characteristics* reprezentuje atrybut.

Są dwa Serwisy IO: *Data* (UUID: AA65\*) oraz *Configuration* (UUID: AA66\*). Odczyt charakterystyki daje wartość zgodną z poprzednio wpisaną. Po dołączeniu zestawu CC2650STK pierwszy raz zwracany jest rezultat auto-testu wykonywanego po włączeniu zasilania. Zawsze pokazuje on wartość 0x7F co oznacza, że wszystkie czujniki pracują. Jeśli nie jest dostępna pamięć External Flash (np. przy dołączonym module DevPack) to wartość wynosi 0x3F.

Serwis pracuje w trzech trybach definiowanych przez charakterystykę konfiguracyjną: 0 – Local, 1 – Remote, 3 – Test. Zapis jest zawsze udostępniony bez względu na tryb. Jednak jest on wykonywany tylko w trybie Remote. Wtedy BLE host ma bezpośredni dostęp do diod LED i brzęczyka. Bit 0 steruje diodą Red LED (LED1). Jednak działanie pozostałych bitów nie jest zgodne z opisem. Wpisanie niektórych wartości (np. 0x3E) przy dołączonym module DevPack do zestawu CC2650STK powoduje kłopoty z zasilaniem. Słychać wyraźnie brzęczenie przełączanej cewki zasilacza 3.3V.

- Rozwiń wiersze serwisów dla obsługi wyprowadzeń ogólnego przeznaczenia (GPIO) procesora (I/O Data).
- Zobacz atrybuty obsługi IO (rys.15).
- Dwukliknij w wierszu *IO Config* na kolumnę *Value*.

- Wpisz 01.
- Kliknij dwukrotnie na wiersz *IO Data* na kolumnę *Value*.
- Wpisz 01.

Zostanie zaświecona czerwona dioda LED1 (górna).

**Obsługa innych modułów z komunikacją BLE**

W taki sam sposób można sterować diodami na innych modułach z obsługą komunikacji BLE. Na tych modułach jest zaprogramowana firmowa aplikacja fabryczna (lub jej nowsza wersja). Na module CC2650LaunchPad można zaświecić obie diody LED (rysunek 16). Podobnie na module CC1350LaunchPad można zaświecić obie diody LED (rysunek 17). Również na module CC1350 SensorTag można zaświecić jedyną zainstalowaną diodę LED (rysunek 18). W ćwiczeniu *Bluetooth Low Energy Fundamentals* w portalu *SimpleLink Academy* [12] są opisane dodatkowe możliwości modyfikowania profilu oraz sposobu pracy łącza BLE.

Henryk A. Kowalski  
kowalski@ii.pw.edu.pl

