

System do wyznaczania wydajności instalacji fotowoltaicznej

Streszczenie. W artykule zaprezentowano system monitorowania ilości wyprodukowanej energii przez panele fotowoltaiczne w danej lokalizacji, ustawione odmiennie od optymalnej. Umożliwia to potencjalnym inwestorom określenie faktycznej wydajności planowanej instalacji jeszcze przed podjęciem decyzji inwestycyjnej i wprowadzenie ewentualnej korekty projektu.

Abstract. The article presents the system for monitoring the amount of energy produced by photovoltaic panels in the given location. It is assumed that they are set differently than the optimal. This enables potential investors to find out the effective performance of the planned installation before the investment decision is taken to introduce the important correction of the project. (**The system for monitoring of the efficiency of photovoltaic station**)

Słowa kluczowe: monitoring, panele fotowoltaiczne, projekt, wydajność.

Keywords: monitoring, photovoltaic panels, design, performance.

Wstęp

Wykorzystywanie promieniowania Słońca do wytwarzania energii elektrycznej, przy użyciu paneli fotowoltaicznych, rozwija się obecnie bardzo dynamicznie niemal we wszystkich krajach świata. Na koniec grudnia 2021 r. moc zainstalowana fotowoltaiki w Polsce wyniosła 7,7 GW, tzn. niemal 2 krotnie więcej niż w grudniu 2020 r. Moc elektryczna wszystkich rodzajów źródeł energii, tzn. konwencjonalnych i odnawialnych, w grudniu 2021 r., to prawie 56 GW. OZE ma udział 30 proc. (prawie 17 GW), przy czym fotowoltaika zajmuje pierwsze miejsce z 45 % udziałem wyprzedzając elektrownie wiatrowe (7,0 GW). Specyfiką instalacji fotowoltaicznych jest to, że generują więcej energii elektrycznej w okresach letnich, z uwagi na większe nasłonecznienie. Jednak panujące wówczas dość wysokie temperatury powodują spadek sprawności ogniw. Dlatego też, najlepsze efekty uzyskiwane są nie zawsze w najcieplejszych miesiącach, (lipiec, sierpień). Np. w 2020 r., rekordowym miesiącem, wykorzystania fotowoltaiki w Polsce był kwiecień, (małe zachmurzenie i umiarkowana temp.). Rekordowy zaś uzysk energii w roku 2020, w ciągu doby, 12,3 GWh, odnotowano w dniu 12 sierpnia. Polityka Energetyczna Polski zakłada wzrost mocy zainstalowanych paneli fotowoltaicznych do ok. 16 GW w 2040 r.

Aktualna dynamika instalacji farm fotowoltaicznych oraz indywidualnych instalacji przydomowych, pozwala przypuszczać, że wielkość osiągnięta będzie wcześniej i to z nadmiarem.

Znaczna część potencjału w zakresie technologii solarnych występuje przy tym w małych instalacjach dachowych. Jednocześnie ma miejsce szybki rozwój technologii oraz wchodzi na rynek rozwiązania innowacyjne. Należy tu wymienić m. in. wprowadzanie modułów o większej sprawności, modułów dwustronnych, ogniw i modułów tandemowych, podnoszenie sprawności, zmniejszanie zużycia energii oraz śladu węglowego w procesach produkcji urządzeń fotowoltaicznych, [9, 10].

Panele fotowoltaiczne są głównymi elementami systemu generowania energii słonecznej, które służą do konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Energia generowana przez system fotowoltaiczny zależy od temperatury, natężenia promieniowania słonecznego, kierunku i widma promieniowania słonecznego oraz kierunku i kąta nachylenia paneli fotowoltaicznych. Jednym z istotnych celów systemów fotowoltaicznych jest uzyskiwanie

maksymalnej ilości energii elektrycznej. W przypadku instalacji stacjonarnej osiąga się to poprzez odpowiednie ustawienie paneli. Optymalna wydajność paneli zależy nie

tylko od optymalnego ich ustawienia wobec bezpośrednich promieni słonecznych, ale też od promieniowania odbitego od różnych obiektów, itp.

Problematyką tymi zajmuje się wiele firm i ośrodków naukowo-badawczych, np. [2, 4, 7, 8].

Projekt instalacji fotowoltaicznej wymaga podjęcia decyzji czy zastosowany będzie system z panelami stacjonarnymi czy też system nadążny, tzn. śledzący Słońce, jedno czy dwuosiowy. W przypadku wyboru systemu stacjonarnego istnieje problem optymalnego ustawienia paneli w danej lokalizacji. Podobny problem powstaje w przypadku, gdy kąt ustawienia paneli jest uwarunkowany konstrukcją i ustawieniem dachu, na którym planowana jest instalacja fotowoltaiczna. W takich przypadkach, przed wykonaniem projektu instalacji fotowoltaicznej, zwłaszcza pod kątem ilości pozyskiwanej energii, korzystnie jest dokonanie odpowiednich pomiarów dla planowanych miejsc i ustawień paneli [2, 4, 7, 8].

Wydajność instalacji fotowoltaicznej zależy głównie od usytuowania paneli. Właściwości paneli określane są przy standardowych warunkach testowych. W Polsce, moc maksymalna paneli określana jest przy ustawieniu ich w kierunku południowym, przy kącie nachylenia 35° - 37°. Jeśli warunki lokalne wymuszają nachylenie instalacji paneli pod innym kątem lub też ukierunkowanie ich w inną niż południową stronę, wydajność paneli fotowoltaicznych jest inna, tzn. mniejsza niż katalogowa. W takich przypadkach korzystne jest ustalenie faktycznej wydajności paneli.

Do wyznaczania charakterystyk paneli fotowoltaicznych można wykorzystać tradycyjne urządzenia pomiarowe. Jednakże użycie klasycznych przyrządów pomiarowych i dokonywanie wielu odczytów pomiarów przez obsługę a nawet automatycznie, przy zastosowaniu klasycznych układów pomiarowych i rejestratorów, jest dość uciążliwe, kosztowne i często trudne do zrealizowania.

Ogniwo fotowoltaiczne jest elementem półprzewodnikowym, w którym następuje konwersja, (przemiana), energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Właściwości i charakterystyki fotoogniw, podawane przez producentów, mierzone są w standardowych warunkach testowych. W innych, rzeczywistych warunkach pracy, parametry te nie są znane. Istnieją tylko dane statystyczne zgromadzone na podstawie pomiarów istniejących już

instalacji na przełomie kilkunastu ostatnich lat. Przyjmuje się, że na obszarze Polski, panel fotowoltaiczny, o mocy 1 kW, skierowany na południe, nachylony pod kątem 30°, w okresie roku generuje około 1000 kWh energii elektrycznej.

W niektórych jednak przypadkach, z różnych względów, moduły nie mogą być ustawione optymalnie. Ustawienie ich pod innym kątem nachylenia i/lub w innym kierunku zmniejsza ich wydajność. Wówczas, w celu osiągnięcia zakładanej wydajności instalacji, projekt wymaga wprowadzenia stosownych korekt.

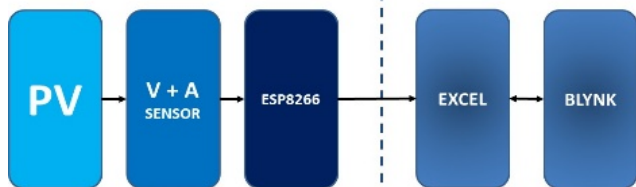
W celu ustalania wielkości korekt opracowany został Informatyczny System Monitorowania Instalacji Fotowoltaicznych, (dalej tylko ISMIF). System ten umożliwia przeprowadzenie fizycznej symulacji działania instalacji fotowoltaicznej w danej lokalizacji. Pozwala on określać wydajność planowanej instalacji fotowoltaicznej przed podjęciem ostatecznych decyzji inwestycyjnych. Umożliwia on pomiar i rejestrację ilości wytwarzanej energii elektrycznej przez panele fotowoltaiczne oraz umieszczenie wyników pomiarów w arkuszu kalkulacyjnym celem późniejszej analizy. Zastosowanie takiego systemu rozwiązuje problem ustalenia zależności wydajności przyszłej instalacji fotowoltaicznej od czynników lokalnych, które trudno określić na etapie ich projektowania, [1].

Idea proponowanego systemu polega na monitorowaniu ilości wyprodukowanej energii w określonym czasie i porównywaniu wyników pomiaru, zmierzonych w danej lokalizacji, z danymi określonymi przez producenta. Umożliwia to potencjalnym inwestorom określenie faktycznej wydajności planowanej instalacji jeszcze przed podjęciem decyzji i uwzględnienie ewentualnej korekty.

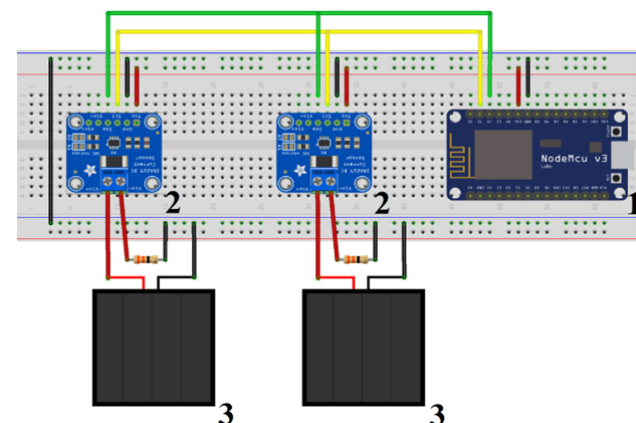
Budowa i działanie ISMIF

Budowa ISMIF oparta została o mikrokontroler ESP8266, na platformie NodeMCU, czujniki napięcia i natężenia prądu stałego INA219 oraz miniaturowe moduły fotowoltaiczne o mocy 1,2 W i napięciu 6 V [14, 15, 16].

Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat blokowy budowy Systemu. Oprócz w/w podzespołów System, zawiera oprogramowanie umożliwiające odczyt oraz analizę danych zebranych podczas działania urządzenia.



Rys. 1. Schemat blokowy urządzenia, [1]



Rys. 2. Układ połączeń ISMIF, 1 - NodeMCU ESP8266; 2 - Moduł INA219; 3 - Moduł fotowoltaiczny, [1, 12]

Na rysunku 2 przedstawiono wizualizacja połączeń elementów zaprojektowanego układu ISMIF [1, 12].

Tak skonfigurowany system wymaga stosownego oprogramowania mikrokontrolera tak, aby dane pozyskiwane przy wykorzystaniu mierników INA219 przetworzone zostały do odpowiedniej postaci, nadającej się do dalszej analizy.

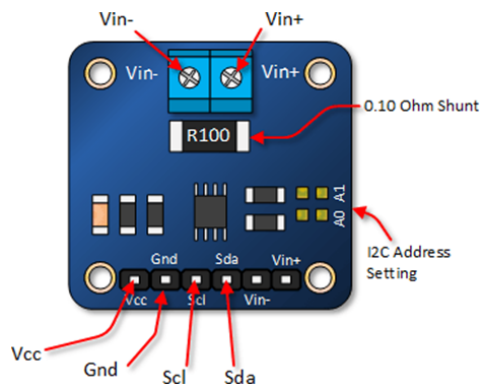
Wyniki pomiarów systemu przekazywane są do arkusza kalkulacyjnego w celu tworzenia tabel oraz wykresów uzysków energii wygenerowanej przez testowane moduły fotowoltaiczne. Jednocześnie następuje odpowiednie skonfigurowanie aplikacji mobilnej BLYNK, dzięki której możliwy jest podgląd wyników poprzez urządzenia mobilne (iOS, Android), [11, 13].

Podstawowym elementem zaprojektowanego ISMIF jest płytka rozwojowa zestawu NodeMCU typu open-source, przeznaczona dla budowy prototypów IoT. Opiera się ona na układzie ESP8266 zawierającym mikrokontroler Tenslica Xtensa 32-bit LX106 RISC, który pracuje z częstotliwością zegara od 80 MHz do 160 MHz. NodeMCU posiada 128 KB pamięci RAM oraz 4 MB pamięci Flash do przechowywania danych i programów. Widok tego zestawu przedstawiony jest na rysunku 3. Niewielkie wymiary, duża moc obliczeniowa oraz wbudowany moduł komunikacji bezprzewodowej Wi-Fi sprawia, że idealnie nadaje się ona do projektów IoT, [3].



Rys. 3. Zestaw rozwojowy NodeMCU ESP8266, [15]

Głównym celem ISMIF jest umożliwienie pomiaru mocy dostarczanej przez 2 moduły fotowoltaiczne (napięcie, natężenie prądu, moc), co pozwala na określenie wydajności modułu testowanego względem modułu referencyjnego (nachylonego pod kątem 30° względem południa). Do tego celu wykorzystane zostały układy pomiaru napięcia i natężenia prądu INA219, wyposażone w interfejs kompatybilny z I2C, [16]. Programowalna wartość kalibracji umożliwia bezpośredni odczyt prądu w amperach. Ina219 może pracować z napięciem zmieniającym się w zakresie od 0 do 26 V. Napięcie zasilania tych układów wynosi 3 – 5,5 V, a pobór prąd nie przekracza 1 mA. Widok modułu INA219 przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4. Moduł INA219, [16]

Prąd obliczany jest, zgodnie z prawem Ohma. Ponieważ rezystancja bocznika tego modułu wynosi 0,1 Ω a maksymalne napięcie bocznikowe 320 mV, to maksymalny prąd, który można zmierzyć modułem INA219 wynosi 3,2 A. Uwzględniając, że maksymalne napięcie wynosi 26 V, zakres pomiarowy mocy modułu INA219 wynosi 83 W.

A więc moduł INA219 jest w stanie monitorować cztery różne parametry:

- napięcie bocznikowe (shunt voltage);
- napięcie magistrali (bus voltage);
- natężenie prądu (current);
- moc (power).

Każdy z pomiarów i obliczeń przechowywany jest w rejestratorze, który za pomocą interfejsu I2C przekazuje wartości do mikrokontrolera ESP8266. INA219 pozwala na monitorowanie do czterech urządzeń jednocześnie dzięki programowalnym adresom I2C (0x40, 0x41, 0x44, 0x45).

W celu zminimalizowania kosztów urządzenia oraz niewielkich rozmiarów do konstrukcji ISMIF zastosowano moduły fotowoltaiczne, przedstawione na rysunku 5, o napięciu 6 V o wymiarach, 100 mm x 60 mm, [6].



Rys. 5. Moduł fotowoltaiczny, [1]

W celu pomiaru natężenia prądu płynącego z modułów fotowoltaicznych zastosowana została żarówka o napięciu 5 V, która pobiera niemal stałą wartość prądu podczas działania modułu fotowoltaicznego.

Na rysunku 6 przedstawiony jest schemat działania Systemu Informatycznego. Jak już wyżej wspomniano, jego podstawowym zadaniem jest pomiar napięcia i natężenia prądu płynącego z obu modułów fotowoltaicznych. Dane te w postaci cyfrowej przesłane są do pliku oraz aplikacji mobilnej BLYNK. Analiza wyników za pośrednictwem arkusza kalkulacyjnego pozwala na szczegółowy bilans pracy oraz analizę porównawczą obu zastosowanych w systemie modułów fotowoltaicznych.



Rys. 6. Diagram działania ISMIF, [1]

Oprogramowanie ISMIF

Przy opracowaniu ISMIF wykorzystano następujące narzędzia informatyczne:

- język programowania C++;

- środowisko programistyczne Arduino IDE;
- program Fritzing;
- program CoolTerm;
- aplikacja mobilna BLYNK;
- pakiet biurowy Microsoft Office.

W języku C++ zaprogramowany został mikrokontroler modułu NodeMCU ESP8266.

Arduino IDE (Integrated Development Environment) - wieloplatformowa aplikacja: do tworzenia i przesyłania programów do pamięci procesora modułu NodeMCU, kompatybilnego do systemów Arduino. Kod Źródłowy IDE jest dostępny na licencji GNU General Public License.

Fritzing - platforma open source do projektowania układów elektronicznych. Umożliwia dokumentowanie prototypu opartego na platformie Arduino (oraz kompatybilnych) i projektowanie PCB.

CoolTerm - darmowa aplikacja służąca do odczytu danych z mikrokontrolerów podłączonych do terminala portu szeregowego. Wartości zapisywane będą zostaną w pliku tekstowym, po czym importowane będą do arkusza kalkulacyjnego w celu dalszej analizy.

BLYNK - aplikacja mobilna działająca na platformach iOS i Android. Umożliwia ona szybkie tworzenie interfejsów do kontrolowania i monitorowania projektów sprzętowych z poziomu urządzeń mobilnych. Pozwala ona na utworzenie pulpitu nawigacyjnego z rozmieszczonymi przyciskami, wskaźnikami, wykresami oraz innymi widżetami do kontroli i odczytu danych ze sprzętu typu Arduino.

Microsoft Office - jeden z najpopularniejszych pakietów aplikacji biurowych. Przy tworzeniu ISMIF wykorzystany został program Microsoft Excel – arkusz kalkulacyjny, który służy do analizy wyników oraz tworzenia wykresów graficznych.

Do stworzenia ISMIF zastosowano język C++ dla mikrokontrolerów i platform IoT z rodziny Arduino oraz NODEMCU. W programie Arduino IDE zawarto zbiór instrukcji mających na celu zdefiniowanie poszczególnych operacji:

- połączenie mikrokontrolera z siecią Wi-Fi;
- inicjalizacja mierników INA219;
- odczyt wartości mierników INA219;
- obliczenie wartości całkowitej energii wyprodukowanej przez moduły fotowoltaiczne;
- export danych do serwisu BLYNK za pośrednictwem Internetu;
- export danych za pośrednictwem portu szeregowego.

Programowanie mikrokontrolera

Do oprogramowania mikrokontrolera ISMIF wykorzystano platformę Arduino IDE. Umożliwia ono pisanie, modyfikowanie oraz konwersję programu w szereg instrukcji zrozumiałych dla mikrokontrolera zamontowanego na zestawie ESP8266. Zestaw ten jest kompatybilny z Arduino i programowalny przez Arduino IDE, które służy, jako edytor i kompilator kodu przesyłanego do mikrokontrolera za pomocą przewodu z konektorem USB.

Wykorzystanie aplikacji Arduino polega na wykonaniu następujących czynności:

- pobranie oprogramowania Arduino IDE;
- uruchomienie oprogramowania oraz instalacja wymaganych bibliotek (ESP8266, INA219, BLYNK);
- wprowadzenie kodu napisanego w języku C++;
- wybór odpowiedniego portu szeregowego;
- sprawdzenie i załadowanie programu do mikrokontrolera.

Pierwsza część skryptu ma za zadanie import bibliotek Wire oraz Adafruit INA219. Biblioteka Wire umożliwia mikrokontrolerowi korzystanie z komunikacji I2C, magistrali, przez którą czujnik prądu i napięcia INA219 łączy się z mikrokontrolerem. Biblioteka Adafruit INA219 ułatwia obsługę

samego czujnika, dzięki czemu do każdego pomiaru potrzebna jest tylko jedna funkcja. Konieczny jest też import biblioteki ESP8266WiFi, odpowiedzialnej za komunikację mikrokontrolera z siecią bezprzewodową oraz BlynkSimpleEsp8266 pozwalającej na eksport danych do aplikacji mobilnej BLYNK.

Po zintegrowaniu wymaganych bibliotek, tworzony jest obiekt o nazwie ina219_A oraz ina219_B (komunikujące się z mikrokontrolerem adresami 0x40 oraz 0x41). Po tym następuje zdefiniowanie kodu autoryzacyjnego BLYNK, (dostępnego po zalogowaniu się do aplikacji), nazwy sieci Wi-Fi, z którą połączy się mikrokontroler, oraz hasła dostępu do sieci Wi-Fi.

W następnym etapie następuje inicjalizacja komunikacji szeregowej z prędkością 115.200 bit/s, w celu wyświetlania pomiarów na szeregowym monitorze Arduino IDE oraz CoolTerm.

Kolejnym etapem jest inicjalizowanie funkcji Begin oraz drukowanie komunikatu o gotowości na wyjściu szeregowym.

W ostatnim etapie tworzony jest szereg funkcji wyświetlających wszystkie pomiary, które zamierza się zachować. Stworzone są one z odpowiednimi tabulatorami, umożliwiającymi późniejsze kopiowanie wyników do pliku tekstowego, a następnie import do arkusza kalkulacyjnego, (który umożliwia analizę wyników i tworzenie wykresów), [5].

Konfiguracja programu CoolTerm

Aby zapisać wyniki z wyjścia szeregowego, jako przetwarzalne dane, wykorzystano oprogramowanie o nazwie CoolTerm. Aplikacja ta stworzona została przez Rogera Meyera i udostępniana jest na licencji freeware. W celu uruchomienia odczytu portu szeregowego, należy ustawić we właściwościach aplikacji odpowiedni port COM oraz szybkość transmisji zadeklarowaną wcześniej w kodzie źródłowym. Następnie należy dokonać połączenia z urządzeniem zewnętrznym, (przycisk Connect), co zainicjuje rozpoczęcie przechwytywania danych do pliku tekstowego (Capture to text).

Konfiguracja aplikacji mobilnej BLYNK

W prezentowanym Systemie Informatycznym do podglądu danych pochodzących z mikrokontrolera zastosowano darmową aplikację mobilną BLYNK. Po zainstalowaniu aplikacji na urządzeniu mobilnym (Android lub iOS) najpierw należy utworzyć darmowe konto. Po zalogowaniu na to konto użytkownik ma możliwość dodania do swojego pulpitu nowego projektu. Końcowa konfiguracja aplikacji polega na dodaniu do projektu wybranych widżetów (wyświetlacz wartości, wskaźnik, wykres, itp.) oraz na odpowiednim skonfigurowaniu danych wejściowych. W kodzie źródłowym oprogramowania mikrokontrolera należy przypisać żądane parametry do pinów wirtualnych, po czym przyporządkować je do wybranych wcześniej wykresów czy też wskaźników.

Wykorzystana aplikacja mobilna umożliwia podgląd danych w czasie rzeczywistym jak również ich późniejszy eksport do pliku typu CSV. Tym samym możliwa jest też późniejsza obróbka danych.

Testowanie ISMIF

Opisany wyżej ISMIF został zrealizowany fizycznie i poddany badaniom mającym na celu sprawdzenie możliwości jego praktycznego zastosowania, sprawności działania oraz jakości.

Testowanie jest niezbędnym elementem tworzenia sprzętu i oprogramowania. Umożliwia ono wyeliminowanie

błędów, które mogłyby przyczynić się do wadliwego funkcjonowania wykonanego systemu.

Testowanie ISMIF przeprowadza się za pomocą komputera PC oraz urządzenia mobilnego. Programy komputerowe, użyte do budowy oraz testowania prezentowanego urządzenia, (Arduino IDE, CoolTerm, arkusz kalkulacyjny), wymagają odpowiedniej konfiguracji sprzętowej, tzn.:

- system operacyjny: Windows 7 lub nowszy; Mac OS X 10.10 lub nowszy; Linux (32 bit);
- procesor Intel Pentium / AMD Athlon z taktowaniem 1 GHz lub wyższym;
- 512 MB pamięci RAM.

W zależności od platformy, na której użyta zostanie aplikacja BLYNK, ma ona następujące wymagania:

- system Android 4.2 lub nowszy.
- system iOS 9.0 lub nowszy.

Testowanie statyczne

Testowanie statyczne ma na celu analizę kodu programu pod kątem ewentualnych błędów. Niniejszy program mikrokontrolera został napisany w języku C++. Podczas tworzenia kodu był on na bieżąco weryfikowany poprzez środowisko programistyczne Arduino IDE a występujące błędy były natychmiast korygowane.

Testowanie dynamiczne

Testowanie dynamiczne polega na sprawdzeniu działania systemu, tj. na uruchomieniu urządzenia i sprawdzaniu działania poszczególnych jego funkcji. Sprawdza się zwłaszcza czy uzyskane podczas pomiarów dane są poprawne i we właściwy sposób przekazywane do aplikacji zewnętrznych.

Po zestawieniu ISMIF, oprogramowaniu mikrokontrolera oraz konfiguracji aplikacji zewnętrznych, przystąpiono do testów dynamicznych. Sprawdzone działanie algorytmu opracowanego systemu pomiarowego.

Po sprawdzeniu działania wszystkich funkcji ISMIF przystąpiono do testowania urządzenia w warunkach rzeczywistych. System został zabudowany do hermetycznej obudowy, chroniącej go przed wpływem warunków atmosferycznych, po czym pozostawiony we wcześniej ustalonej lokalizacji na kilkanaście dni. Testowanie odbyło się w sierpniu 2020 roku. Ze względu na zmienne warunki pogodowe, wyodrębnione zostały tylko wyniki pomiarów podczas dni bezchmurnych. Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów z jednego, wybranego, dnia testów.

System Informatyczny został zaprojektowany w taki sposób, aby pomiar prądu i napięcia prądu generowanego przez testowane moduły fotowoltaiczne dokonywany był, co 1 sek. Dane te były zapisywane w postaci pliku tekstowego, po czym zaimportowane do arkusza kalkulacyjnego. Ponadto kod mikrokontrolera obliczał też ładunek (w mC) oraz energię wygenerowaną w ciągu całego dnia (w mWh) i wyświetlał wynik w czasie rzeczywistym, w aplikacji BLYNK.

Wyniki testu

W celu sprawdzenia funkcjonalności wykonanego według projektu systemu przeprowadzone zostały badania testowe przy wykorzystaniu dwóch miniaturowych modułów fotowoltaicznych (6 V, 200 mA), o różnym usytuowaniu. Jeden moduł – M.1, ustawiony był w kierunku południowym i nachylony pod kątem 30° względem poziomu ziemi, a moduł drugi – M.2, ustawiony był w kierunku południowo – zachodnim i nachylony był pod kątem 45°.

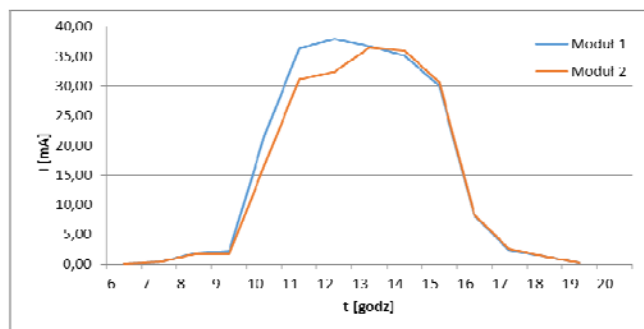
W tabeli 1 przedstawione są wyniki pomiarów i obliczeń całodziennego testu otrzymane podczas badań w dniu

15.08.2020 r. Tzn. wygenerowany przez każdy z obu modułów ładunek elektryczny: $Q = I \times t$ [mAh], oraz energia elektryczna, $E = Q \times U$ [mWh], określone w interwałach 1 godz., od godz. 6:00 do godz. 20:00. Następnie obliczono ładunek oraz energię wygenerowaną w ciągu całego dnia.

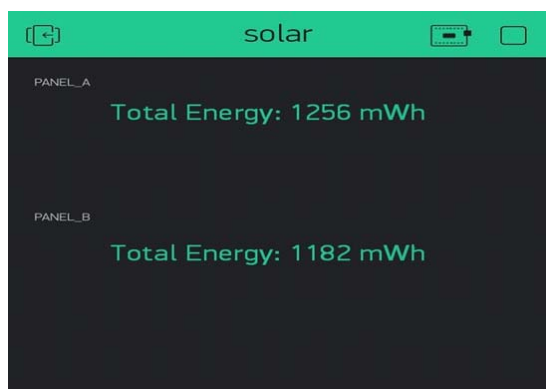
Tabela 1. Wyniki pomiarów, [1]

Czas	Moduł M.1 $Q_1 = I \times t$ [mAh]	Moduł M.2 $Q_2 = I \times t$ [mAh]
06:00 – 07:00	0,17	0,16
07:00 – 08:00	0,40	0,39
08:00 – 09:00	1,78	1,71
09:00 – 10:00	2,19	1,72
10:00 – 11:00	21,01	15,28
11:00 – 12:00	35,44	31,33
12:00 – 13:00	37,00	33,49
13:00 – 14:00	35,83	35,62
14:00 – 15:00	34,26	35,12
15:00 – 16:00	29,36	29,96
16:00 – 17:00	8,08	8,18
17:00 – 18:00	2,32	2,52
18:00 – 19:00	1,30	1,32
19:00 – 20:00	0,25	0,23
ΣQ [mAh]	209,39	197,03
ΣE [mWh]	1.256,34	1.182,18
Skuteczność M.2 względem M.1	—	94 %

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy, obliczonego prądu w czasie, obu modułów, w dniu przeprowadzenia testu.



Rys. 7. Test $I = f(t)$, [1]



Rys. 8. Test. Zrzut ekranu aplikacji BLYNK, [1]

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy ustawieniu paneli instalacji fotowoltaicznych, tak jak moduł M.2, ich wydajność osiągnie 94 % wydajności instalacji ustawionej optymalnie, tzn. tak jak ustawiony został moduł M.1. Taką też korektę powierzchni paneli fotowoltaicznych należałoby wprowadzić do projektu instalacji dla danej lokalizacji, przy ustawieniu paneli w kierunku południowo-zachodnim pod kątem 45°.

Wnioski

Zaprezentowany Informatyczny System Monitorowania Instalacji Fotowoltaicznej, (ISMIF), został stworzony w celu określania faktycznej wydajności instalacji fotowoltaicznej jeszcze na etapie jej projektowania. Potrzeba opracowania takiego systemu wynika z praktyki firm projektujących i realizujących instalacje fotowoltaiczne. Firmy, oferujące w Polsce takie instalacje, przedstawiają zwykle oferty oparte o karty katalogowe modułów fotowoltaicznych zawierających dane przy optymalnych warunkach ustawienia modułów, tzn. w kierunku południowym, pod kątem 30°. Jednakże, z różnych względów, takie ustawienia modułów i całych paneli fotowoltaicznych nie zawsze jest możliwe. Przy innym ich usytuowaniu osiągi uzyskiwanej energii z modułów fotowoltaicznych są mniejsze i zwykle trudne do ustalenia.

Może to być spowodowane skierowaniem połączy dachu np. na południowy – zachód i nachyleniu go pod kątem 45°, itp. Wówczas konieczna jest korekta wydajności modułów. Ustalenie procentowej zmiany wydajności modułów fotowoltaicznych w konkretnych warunkach, bez dokonania specjalistycznych pomiarów, jest praktycznie niemożliwe.

Wdrożenie opisanego Systemu Informatycznego pozwala na ustalenie różnicy wydajności paneli fotowoltaicznych w odniesieniu do ich wydajności określonej przez producentów modułów. Umożliwia to skorygowanie obliczeń liczby modułów fotowoltaicznych potrzebnych do zapewnienia założeń projektowych w zakresie uzyskiwanej energii elektrycznej z całej instalacji fotowoltaicznej.

Zaprezentowany system ISMIF, służący do ustalania faktycznej wydajności paneli fotowoltaicznych, zbudowany został przy niewielkich kosztach, około 50 zł. Wykorzystuje on niedrogie urządzenie oparte na mikrokontrolerze ESP8266, dwa moduły pomiarowe INA219, do pomiaru prądu i napięcia, oraz dwa małe moduły fotowoltaiczne. System monitoruje ilość generowanej przez moduł energii w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie do przeprowadzenia badań dwóch niewielkich paneli fotowoltaicznych – jednego skierowanego na południe oraz drugiego w kierunku wynikającym z planowanej inwestycji – umożliwia akwizycję danych pomiarowych oraz późniejszą ich analizę, co pozwala na dość dokładne określenie wydajności planowanej instalacji fotowoltaicznej. System pozwala na ustalenie faktycznej wydajności planowanej instalacji.

Oprogramowanie systemu, w kodzie Arduino eksportuje dane do pliku i do aplikacji mobilnej. Tradycyjne instrumenty pomiarowe takie jak multimetry, itp. charakteryzują się stosunkowo dużymi cenami. Urządzenia monitorujące i rejestrujące niezbędne parametry są jeszcze droższe. W przypadku multimetrów stosunkowo trudne i uciążliwe jest dokonywanie prawidłowych odczytów, zwłaszcza przy nagłych zmianach napięcia i natężenia prądu, spowodowanych zmianą warunków nasłonecznienia. W wyniku tego „ręczne” pomiary wymagają stosunkowo uciążliwej obsługi i nie odzwierciedlają rzeczywistej charakterystyki pracy instalacji fotowoltaicznej.

Proponowany system można rozbudować, co pozwoli na uzyskanie dodatkowych funkcji. Można go wyposażać min. o następujące elementy:

- czujniki irradancji, do pomiaru gęstości mocy promieni słonecznych;
- akumulator, umożliwiający pracę bez zasilania sieciowego;
- wyświetlacz LCD, który na bieżąco wyświetlałby pomiary parametrów obu modułów fotowoltaicznych;
- czytnik kart pamięci SD, służący do rejestrowania danych z mikrokontrolera do pamięci;
- moduł GSM, dla zapewnienia działania systemu

niezależnie od dostępu do sieci Wi-Fi;

- czujniki temperatury, do monitorowania temperatury pracy modułów.

Zastosowanie proponowanego systemu może pomóc inwestorom i projektantom instalacji fotowoltaicznych przeprowadzać analizę parametrów eksploatacyjnych przy faktycznym planowanym usytuowaniu modułów, i w ten sposób umożliwić podejmowanie właściwych decyzji inwestycyjnych, w zakresie doboru powierzchni całkowitej modułów instalacji fotowoltaicznej, przy małych kosztach.

Podobne systemy monitorowania parametrów paneli fotowoltaicznych w czasie rzeczywistym, z wykorzystaniem zestawów rozwojowych Arduino, modułów INA oraz IoT, opisane zostały np. w [17, i 18], w 2020 r. Nie są to jednak systemy służące do porównywania uzyskiwanej energii w zależności od usytuowania paneli w danej lokalizacji. Nie mogą być więc wprost wykorzystane do korekty projektów instalacji fotowoltaicznych.

Autorzy: inż. Mariusz Bratkowski, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Bielsku Białej, ul. Legionów 81, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: bratkowski@wsiz.edu.pl, prof. dr inż. Zbigniew Frąckiewicz, Wydz. Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 38, 71-310 Szczecin, E-mail: zfrackiewicz@zut.edu.pl, prof. dr inż. Piotr Marecki, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Bielsku Białej, ul. Legionów 81, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: pmarecki@wsiz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Bratkowski M.: Informatyczny system monitorowania wydajności instalacji fotowoltaicznej. PDInż., WSIZ B-B, 2020.
- [2] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G.: Badanie wpływu usytuowania oraz kąta nachylenia dachu na pracę dachówek fotowoltaicznych. Przegląd Elektrotechniczny, ss. 281-283, R. 89, Nr 6, 2013.
- [3] Eichhorn D.: ESP8266 Weather Station: Getting Started, 2016.
- [4] Konarski M., Węgierek P.: Monitoring of photovoltaic micro installations. Przegląd Elektrotechniczny, ss. 238-241, R. 93, Nr 3, 2017.
- [5] Monk S.: Programming Arduino: Getting Started with Sketches, Second Edition. McGraw-Hill Education TAB, 2016.
- [6] Schmidt P.: "Install Your Own Solar Panels. Storey Publishing LLC, 2017.
- [7] Sołtyś P.B.: Sterownik informatycznego systemu optymalnego sterowania kolektorami słonecznymi. PDInż. WSIZ B-B, 2017.
- [8] Szczerbowski R. Instalacje fotowoltaiczne - aspekty techniczno-ekonomiczne. Przegląd Elektrotechniczny, ss. 31-36, R. 90, Nr. 10, 2014.
- [9] www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce/, 2022.
- [10] www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/ieo-mapa-drogowa-fotowoltaika-9117.html. Mapa Drogowa Rozwoju Przemysłu Fotowoltaicznego w Polsce do 2030 roku, 2020.
- [11] www.arduino.cc, 2021.
- [12] www.fritzing.org, 2007.
- [13] www.blynk.io, 2021.
- [14] www.nodemcu.com 2014.
- [15] www.esp8266.com, 2018.
- [16] www.texasinstruments.com, 2020.
- [17] www.circuitdigest.com/microcontroller-projects/iot-solar-panel-power-monitoring-system-using-esp32-and-thingspeak, 2020.
- [18] www.hackster.io/Aboubakr_Elhammoumi/solar-panel-data-monitoring-using-arduino-and-labview-8b4c8f, 2020.