

**Sprawozdanie z badań w ramach programu
„Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”**

**Projekt pod nazwą:
Prototypowy układ zasilania lokomotywy
z wykorzystaniem alternatywnych źródeł energii.**

Autorzy raportu:
inż. Faustyna Finke
inż. Mateusz Słomiński
Michał Pięt
Jakub Żytkowski

1. Cel badań

Celem badania było sprawdzenie wydajności instalacji fotowoltaicznej zrealizowanej dzięki dofinansowaniu pozyskanemu przez zespół Koła Naukowego Inżynierów Transportu Publicznego z Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach programu Studenckie Koła Naukowe Tworzą Innowacje w roku 2023. Założeniem budowy instalacji było pozyskanie w ramach jej działania energii, która pozwoliłaby na zasilenie baterii niskiego napięcia oraz baterii trakcyjnych lokomotywy PUTrain. Projekt zakładał zabudowę na dachu lokomotywy dwóch paneli fotowoltaicznych o łącznej mocy 200W (każdy moduł o mocy 100W). Generowana przez instalację energia służy do zasilenia zarówno obwodów sterujących lokomotywy jak i baterii trakcyjnych służących do zasilania silników lokomotywy.

Badanie pozwoliło na określenie w jakim stopniu energia wygenerowana przez ogniwa fotowoltaiczne przełożyć się może na zasięg lokomotywy. Pojazd, na którym zabudowane zostały ogniwa zasilany jest z akumulatorów, co znacząco ogranicza jego zasięg. Instalacja fotowoltaiczna może w pewnym stopniu przyczynić się do zwiększenia zasięgu lokomotywy - zdolności pojazdu do samodzielnego ruchu.

Do przeprowadzenia badania wykorzystano aparaturę pomiarową należącą do Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Wydziału Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej

2. Obiekt badawczy

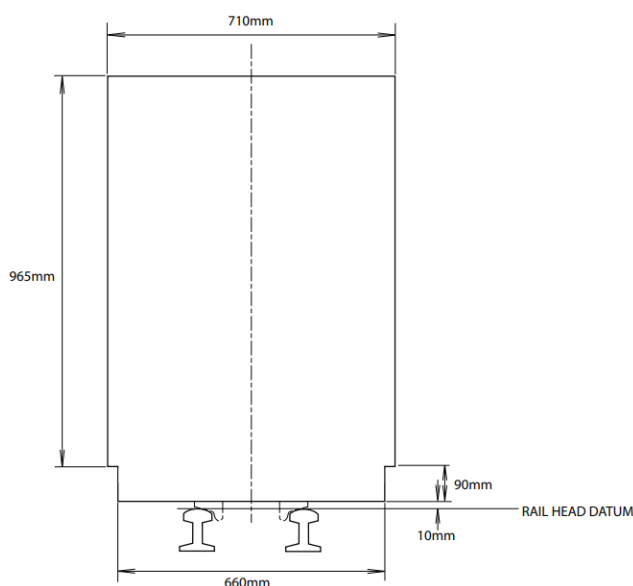
Obiektem badawczym w przeprowadzonym eksperymencie są dwa moduły paneli fotowoltaicznych SolarFam, każdy o mocy 100W, umieszczonych na dachu lokomotywy PUTrain, zbudowanej przez studentów zrzeszonych w Kole Naukowym Inżynierów Transportu Publicznego.

Zastosowane moduły składają się z ogniw monokrystalicznych. W porównaniu do innych dostępnych paneli – polikrystalicznych - cechują się one wyższą wydajnością, co stanowiło istotny czynnik ze względu na ograniczony rozmiar dostępnej powierzchni dachu lokomotywy. Powierzchnia dachu zdolna do zabudowy wynosiła $1,1 \text{ m}^2$, natomiast powierzchnia jednego z modułów to $0,53 \text{ m}^2$ - łączna powierzchnia obu modułów wynosi $1,06 \text{ m}^2$ - wykorzystano zatem 96% dostępnej przestrzeni w celu maksymalizacji możliwości produkcji energii elektrycznej. Sprawność paneli monokrystalicznych waha się od 16% do nawet 25%, podczas gdy modele polikrystaliczne mają sprawność na poziomie od 14% do 19%.

Istotnym aspektem była również estetyka ogniw (podlega ocenie w trakcie zawodów) i sposób ich montażu. Panele z ogniwami monokrystalicznymi występują w barwie czarnej, która wpisuje się w design lokomotywy zaprojektowany w celu uzyskania modernistycznego wyglądu pojazdu. Ważną właściwością wykorzystanych paneli jest odporność na działanie wody, co odegrało znaczącą rolę w ich doborze na dach pojazdu szynowego. Grubość wykorzystanych modułów elastycznych wynosi zaledwie 2 mm co znacząco ułatwia możliwość ich montażu - pojazd ograniczony jest skrajnią pojazdu (obszar poza którego nie może wystawać żadna z jego części), zastosowane moduły pozwoliły zatem na zainstalowanie ich na dachu lokomotywy i nie spowodowały konieczności wprowadzania modyfikacji konstrukcji pojazdu i tworzenia stelażu dedykowanego do montażu paneli. Panel elastyczny jest również znacząco lżejszy w porównaniu z modułem przystosowanym do montażu na dachu, przez co została wyeliminowana konieczność budowy wzmocnień konstrukcyjnych. Na panelu znajduje się powłoka ochronna z tworzywa sztucznego, która zabezpiecza moduł przed uszkodzeniami mechanicznymi, które mogłyby wystąpić podczas użytkowania pojazdu (gałęzie, liście, piach), a także podczas prac utrzymaniowych oraz modernizacyjnych pojazdu.



Zdjęcie 1. Widok na lokomotywę i panele fotowoltaiczne.



Rysunek 1. Skrajnia pojazdu podtyktowana przez organizatorów konkursu.

Pojazdem, na dachu którego zamontowano panele jest lokomotywa zaprojektowanej na tor o rozstaw szyn 10 i ¼ cala. Zaprojektowana została ona w celu udziału w konkursie Railway Challenge. Jednym z wymogów konkursowych jest wodoszczelność pojazdu, co ma zapewnić bezpieczeństwo w kwestii obsługi i poprawnego działania komponentów elektrycznych znajdujących się w pojeździe. W celu spełnienia tego wymogu przygotowano poszycie z laminatu poliestrowo-szklanego. Pojazd przeszedł podczas zawodów Railway Challenge tzw. “scrutineering test”, czyli odbiory techniczne potwierdzające zgodność wykonania pojazdu z wymaganiami konkursowymi. Podczas testów pojazd był polewany wodą w czasie pracy wszystkich podzespołów. Test zakończył się wynikiem pozytywnym potwierdzając wodoszczelność pojazdu.

Lokomotywa ze względu na brak elektryfikacji toru konkursowego została zbudowana jako pojazd akumulatorowy. W pojeździe znajdują się 4 akumulatory przeznaczone do celów trakcyjnych (zasilanie silników lokomotywy) składające się z ogniw litowo-jonowych. Napięcie akumulatorów wynosi 72V prądu stałego, a ich łączna zdolność gromadzenia energii elektrycznej to 9736Wh. Ponadto w pojeździe znajdują się dwa akumulatory litowo-jonowe przeznaczone do zasilania układów bezpieczeństwa i sterowania podzespołów lokomotywy. Napięcie na akumulatorach służących do zasilania obwodów sterowania to 24V prądu stałego.

3. Metodyka badań

3.1 Założenia Badawcze

Główne założenia dotyczą rejestracji mocy generowanej przez instalację składającą się z dwóch paneli fotowoltaicznych połączonych szeregowo, umieszczonych na dachu lokomotywy. Moduły podłączone były przez regulator ładowania MPS 20A MPPT 12/24V do odbiornika.

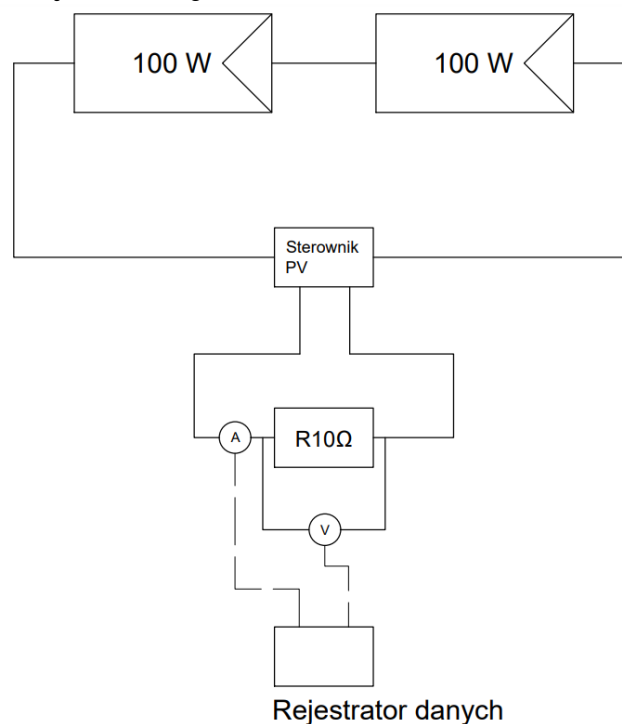
Podczas badań zmierzone zostały takie parametry jak prąd generowany przez panele i napięcie. Na podstawie zmierzonych wielkości obliczono generowaną moc przez układ, a dzięki pomiarowi tych wartości z krokiem 1 sekundy możliwe jest obliczenie zgromadzonej energii w trakcie wykonanych pomiarów.

Dzięki wiedzy na temat wygenerowanej energii w układzie możliwe jest określenie średniej godzinowej produkcji energii elektrycznej, jak również oszacowanie dystansu który jest lokomotywa PUTrain zdolna przejechać na podstawie zgromadzonej w danym dniu energii i jaki procent zasięgu całkowitego ta energia stanowi.

3.2 Lokalizacja i warunki pomiarowe

Badanie wykonane zostało na terenie kampusu Piotrowo Politechniki Poznańskiej. Pomiary prowadzone były w styczniu roku 2024. W celu uzyskania miarodajnych wyników pomiary przeprowadzono w rzeczywistych warunkach obejmujących stochastyczne warunki atmosferyczne. Występowały dni słoneczne, pochmurne oraz z opadami atmosferycznymi. Badania prowadzone były przez 6 dni w przedziałach czasowych pomiędzy godziną 9:00 a 16:00. Przedział czasowy został dobrany ze względu na godziny wschodu i zachodu słońca.

3.3 Schemat pomiarowy instalacji



3.4 Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia pomiarów użyto wielokanałowego rejestratora danych Graphatec GL240 Midi Logger 10, którego celem była rejestracja mierzonych wartości napięcia i prądu. W celu umożliwienia zapisu na rejestratorze wartości prądu wykorzystano przystawkę cęgową CIE CA60 która przeliczała wartość zmierzonego prądu na wartość napięciową, która mogła być zarejestrowana przez rejestrator danych. Aparatura pomiarowa pochodziła z zasobów Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej i została wypożyczona zespołowi na czas trwania pomiarów instalacji.

Parametry techniczne jednego modułu fotowoltaicznego:

Ogniwa	Monokrystaliczne
Moc szczytowa	100W
Sprawność	17,7%
Napięcie jałowe	26,29V
Prąd zwarcia	4,8A
Stopień ochrony	IP67

Parametry techniczne sterownika PV:

Prąd wyjściowy:	20A
Napięcie systemu:	12V/24V (automatyczne wykrywanie)
Maksymalny prąd ładowania:	20A
Maksymalne napięcie paneli:	75V
Maksymalna moc paneli:	260W/520W
Sprawność konwersji:	98%

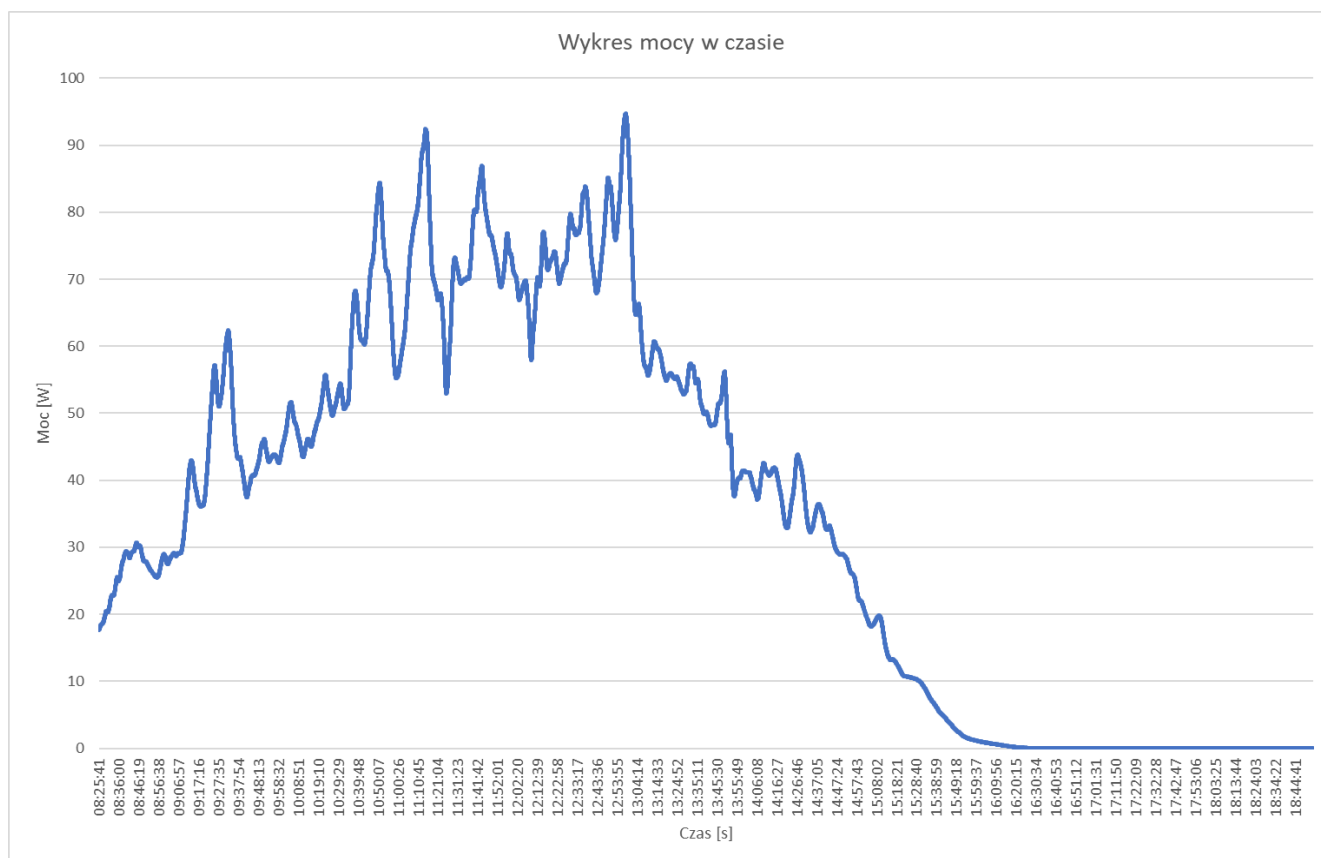
4. Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawione zostały na wykresach obrazujących zmiany mocy wytwarzanej przez instalację fotowoltaiczną w zależności od pory i godziny dnia. Pomiary wykonywane były z dokładnością do 1 sekundy. Wartość generowanej przez moduły mocy uzależniono od godzin dnia, w których wykonywano pomiary, aby ukazać także porę dnia, która bezpośrednio wpłynęła na wyniki badania.

W opisie każdego z wykresów zawarto wartość energii wygenerowanej przez ogniwa słoneczne w czasie badania oraz procent naładowania baterii akumulatorów, o który zostały one uzupełnione. Podano też szacowaną odległość liczoną w metrach o jaką zwiększył się zasięg lokomotywy – znamionowy zasięg pojazdu wynosi 15 kilometrów - jest to przypadek modelowy, w którym lokomotywa wykonuje pracę w trybie ciągłym przez 3 godziny bez doładowania akumulatorów ze stałą prędkością 5km/h ciągnąc ładunek o masie 400kg przy znikomym tarciu po torze, którego nachylenie wynosi 20%. (W odniesieniu do normalnotorowej kolei dopuszczalne maksymalne pochylenie podłużne torowiska może wynosić pomiędzy 6 a 20%). Model obliczeniowy wykorzystany w tym przypadku ma na celu symulację nierzeczywistego stanu podczas którego wymaga się od pojazdu pracy przy pełnym obciążeniu silników i dla takiego też modelu obliczeniowego został oszacowany dystans który pojazd będzie w stanie przejechać przy użyciu zgromadzonej energii.

Dzień 1. 18.01.2024

Temperatura 0°C, brak opadów, 0 godzin słonecznych, pełne zachmurzenie



Wykres 1. Wyniki pomiarów w dniu 1.

W czasie pomiarów w pierwszym dniu badania suma wygenerowanej przez instalację energii wyniosła 361 Wh, co pozwoliło na naładowanie akumulatorów lokomotywy w 3,71%. Warto zauważyć, że wynik ten został osiągnięty podczas pełnego zachmurzenia. Wynik ten mocno kontrastuje, z dniem 4 i 5, kiedy to nasłonecznienie w ciągu dnia było większe. Można jednakże zauważyć, że istotny wpływ ma także obecność opadów danego dnia. W dni kiedy występowały opady, czyli 3, 5 i 6 otrzymane wartości zgromadzonej energii są znacznie niższe.

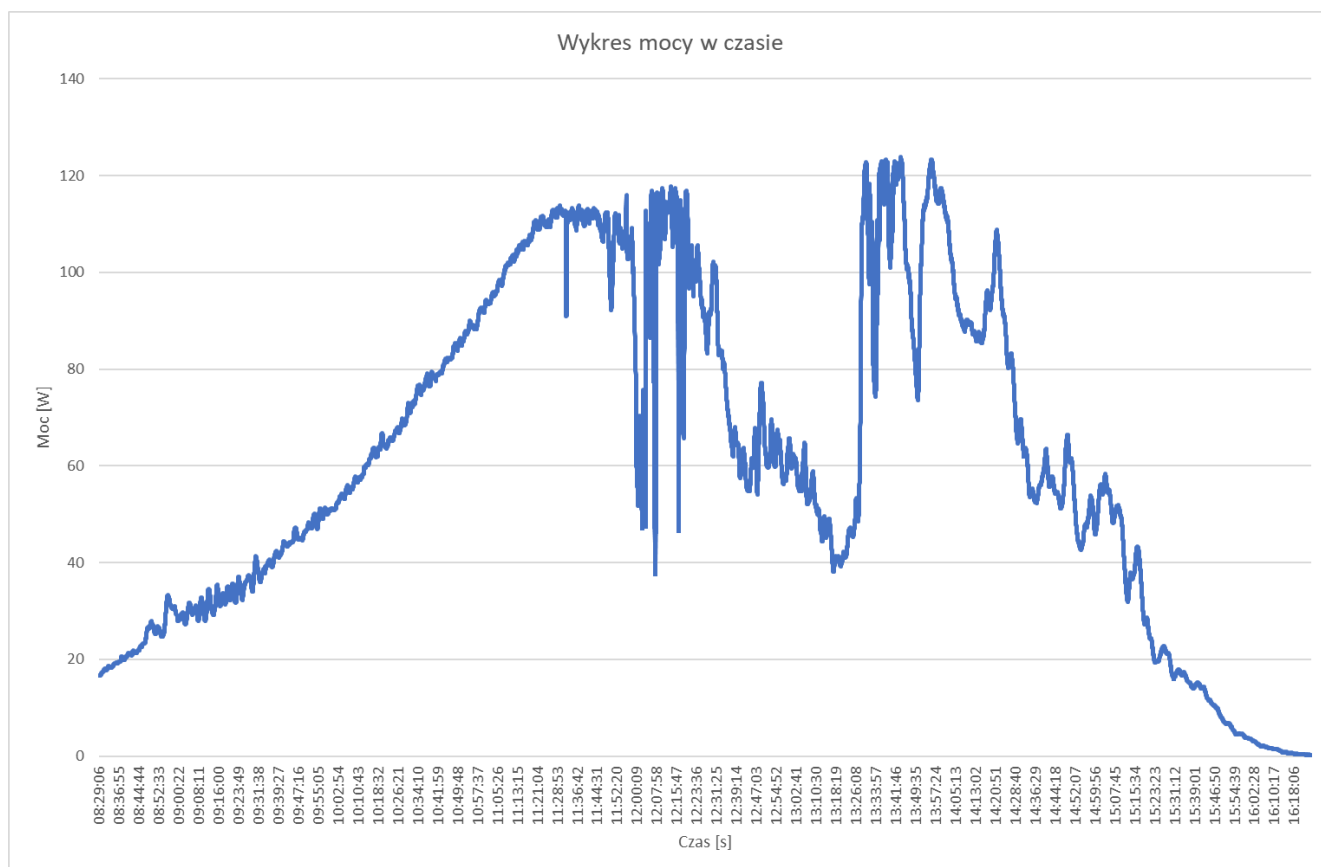
Uzyskana w tym dniu energia przy przyjęciu maksymalnego zasięgu lokomotywy 15 km przy naładowaniu baterii w 100% pozwala na przejechanie 557 metrów korzystając wyłącznie z energii wytworzonej z instalacji fotowoltaicznej na dachu lokomotywy.

Zmagazynowana energia: 362 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 3,71%

Dzień 2. 19.01.2024

Temperatura -2°C, brak opadów, 4 godziny słoneczne, zachmurzenie częściowe



Wykres 2. Wyniki pomiarów w dniu 2.

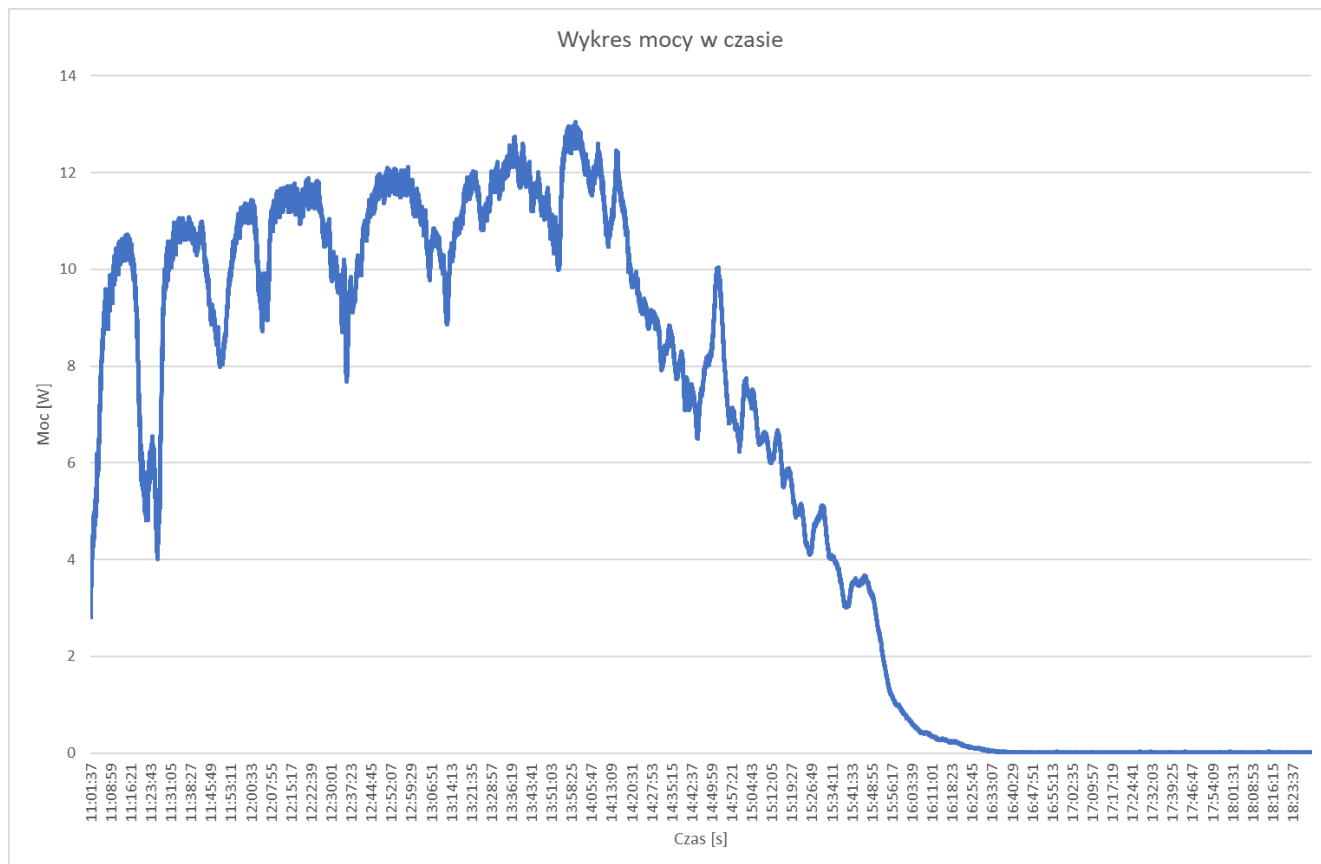
Suma energii wytworzonej przez instalację fotowoltaiczną w drugim dniu pomiarów wyniosła 490 Wh. Jest to najwyższa wartość uzyskana podczas sześciu dni pomiarów. Energia wyprodukowana w ten sposób zapłaciła akumulatory lokomotywy w 5,03%, co przełożyło się na 754 m drogi możliwej do przejechania przez pojazd.

Zmagazynowana energia: 489 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 5,03%

Dzień 3. 22.01.2024

Temperatura 2°C, opady deszczu, 0 godzin słonecznych, pełne zachmurzenie



Wykres 3. Wyniki pomiarów w dniu 3.

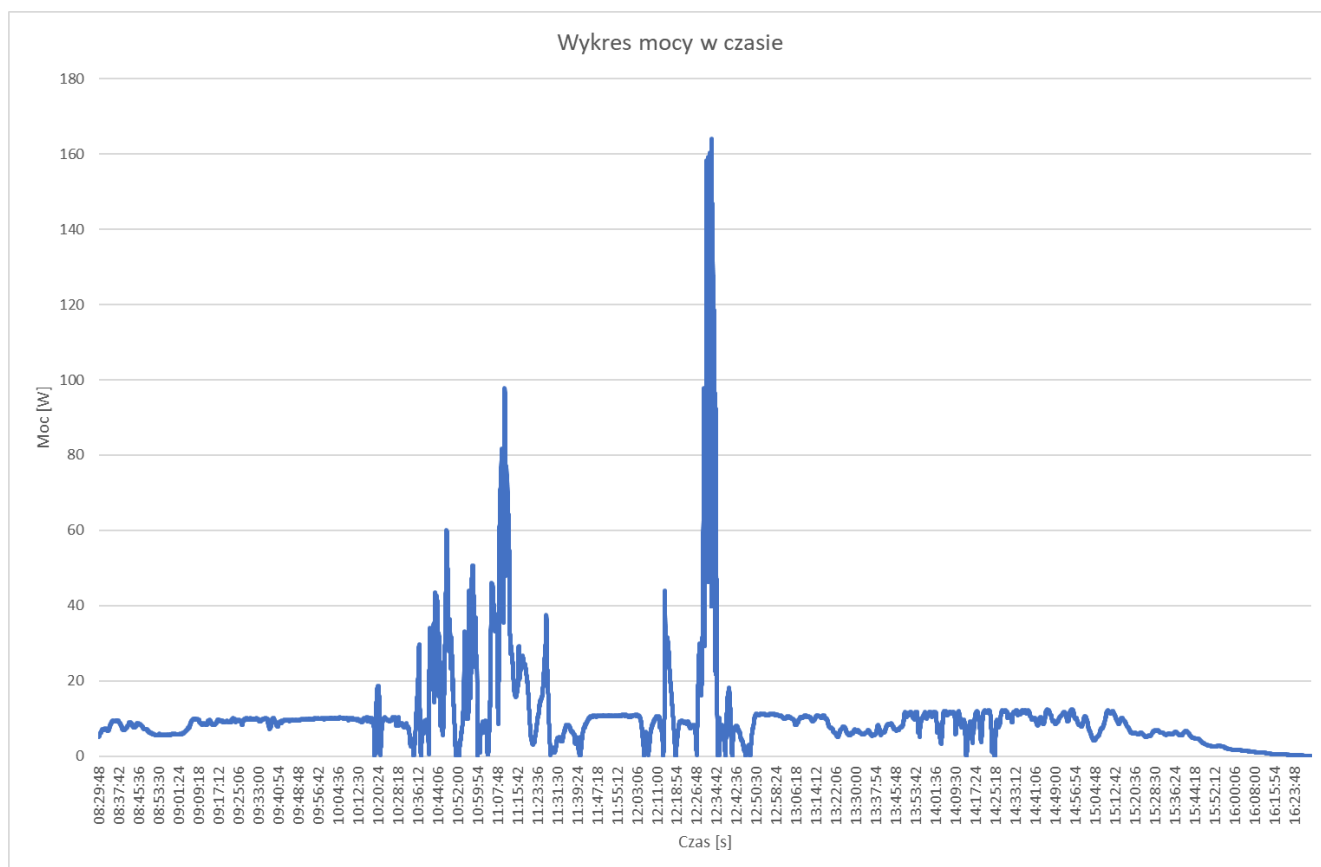
Pomiary w porównaniu do innych dni rozpoczęto dopiero około godziny 11. Wartość mocy chwilowej instalacji nie przekroczyła 14 watów. Warunki były skrajnie niekorzystne - pełne zachmurzenie, a także występujące w tym dniu opady atmosferyczne przyczyniły się do bardzo niskiego wyniku. Zgromadzona energia pozwoliłaby przejechać 69 metrów.

Zmagazynowana energia: 45 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 0,46%

Dzień 4. 23.01.2024

Temperatura 4°C, brak opadów, 2 godziny słoneczne, zachmurzenie częściowe



Wykres 4. Wyniki pomiarów w dniu 4.

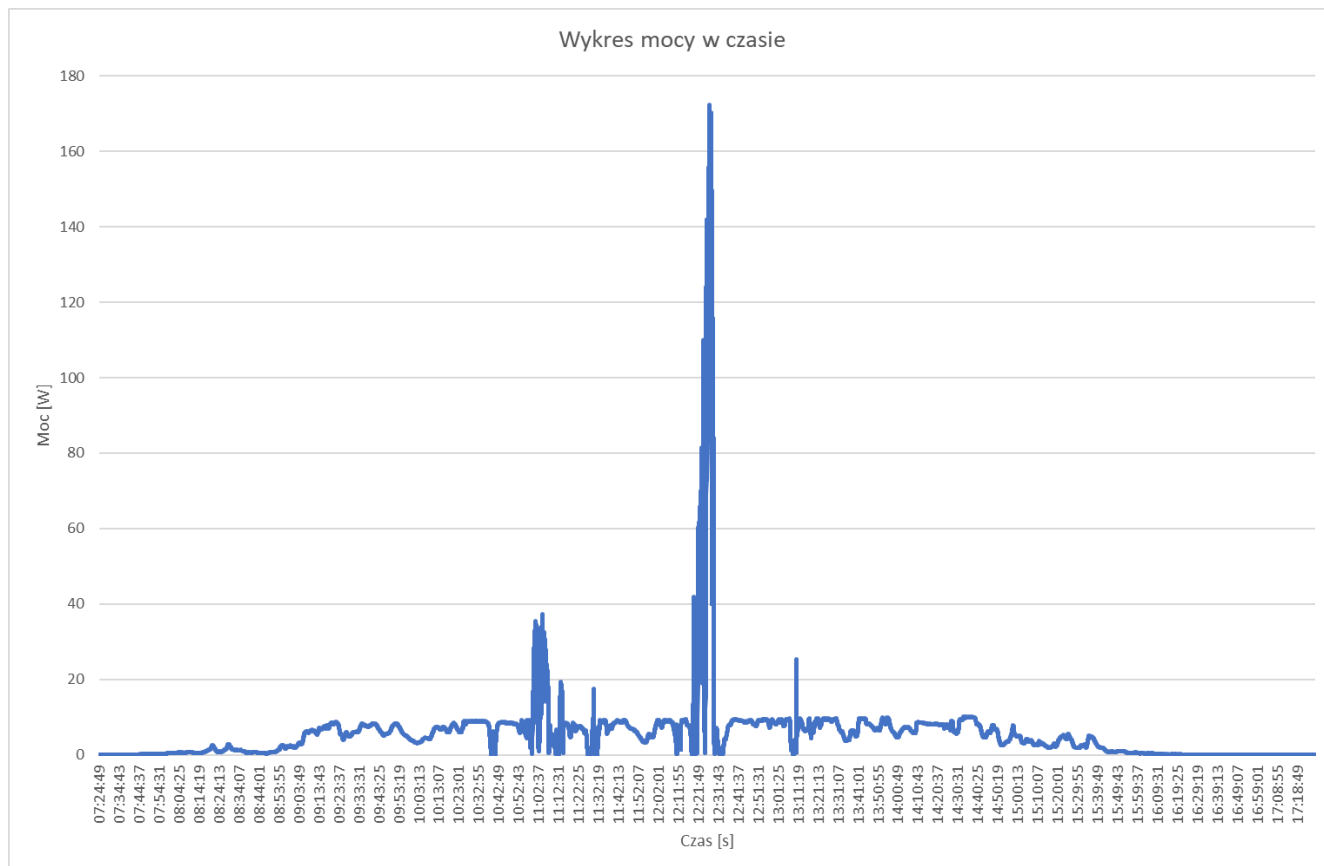
W przypadku pomiarów wykonanych w dniu 4. można zaobserwować znaczny wzrost mocy chwilowej w instalacji, którego przedział czasowy można zakwalifikować w okolicach 2 godzin. Zgromadzona w tym dniu energia 83 Wh pozwoliłaby na przejechanie 129 metrów w określonych warunkach.

Zmagazynowana energia: 83 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 0,86%

Dzień 5. 24.01.2024

Temperatura 6°C, opady deszczu, 2 godziny słoneczne, zachmurzenie częściowe



Wykres 5. Wyniki pomiarów w dniu 5.

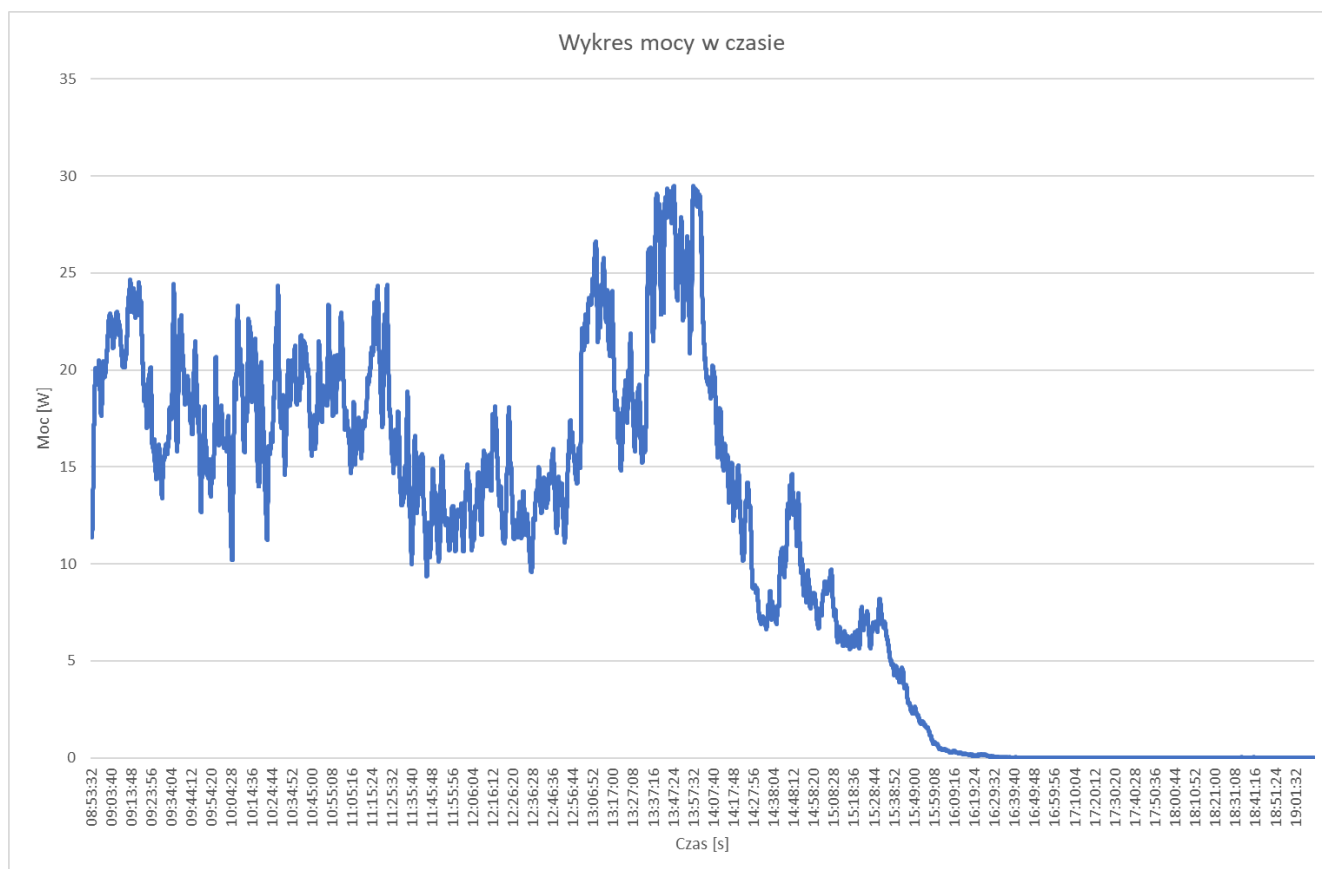
Mimo sumarycznie stosunkowo niskiej wartości pobranej energii w ciągu dnia, warto zwrócić uwagę na skokowy charakter przebiegu. Można na nim zaobserwować, że moc chwilowa osiągnęła wartość ok. 170W. Jest to istotne spostrzeżenie, ponieważ sugeruje, że przy odpowiednich warunkach pogodowych, taka moc jest całkowicie dostępna. Uwzględniając, że styczeń jest jednym z najbardziej niekorzystnych miesięcy do magazynowania energii ze względu na stosunkowo niski współczynnik godzin słonecznych, a także bardzo niski kąt słońca nad horyzontem. Niemniej można stwierdzić, że dostępna moc maksymalna układu jest znacznie wyższa przez co zdolność układu do generowania energii również jest większa. Można zaobserwować również niską produkcję energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną w tym dniu mimo relatywnie długiego czasu dostępności słońca. Najprawdopodobniej przyczyną takiego stanu było wystąpienie tego dnia opadów atmosferycznych. Zmagazynowana energia pozwoliłaby na pokonanie dystansu 88,5 metra przez lokomotywę.

Zmagazynowana energia: 57 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 0,59%

Dzień 6. 25.01.2024

Temperatura 4°C, opady deszczu, 1 godzina słoneczna, zachmurzenie częściowe



Wykres 6. Wyniki pomiarów w dniu 6.

W przypadku 6. dnia pomiarów wartość chwilowa mocy utrzymywała się średnio na poziomie 15 watów. Zmagazynowana w tym dniu energia pozwoliłaby na przejechanie 169,5 metra.

Zmagazynowana energia: 109 Wh

Procent naładowania baterii trakcyjnych lokomotywy: 1,13%

Średnia wyprodukowana moc z 6 dni pomiarów: **191 Wh/dzień**, średnia liczba godzin słonecznych w ciągu dnia pomiarów: 1,5 godziny/dzień, średni procent naładowania baterii/dzień pomiarów: **2%**

Tabela 1. Podsumowanie wyników pomiarów

Dzień pomiarów	Dzień 1	Dzień 2	Dzień 3	Dzień 4	Dzień 5	Dzień 6
Zmagazynowana energia [kWh]	362	489	45	83	57	109
Liczba godzin słonecznych [h]	0	4	0	2	2	1
Procent naładowania baterii [%]	3,71	5,03	0,46	0,86	0,59	1,13
Szacowany dodatkowy zasięg lokomotywy [m]	557	754	69	129	88,5	169,5

5. Wnioski

Zgromadzone wyniki wykazują, że zastosowane rozwiązanie pozwala na przetwarzanie energii słonecznej, która służyć może do ładowania baterii trakcyjnych lokomotywy. Pomiary wykonane zostały w styczniu, który jest jednym z miesięcy z najmniejszą liczbą godzin słonecznych (średnia z sześciu dni: 1,5 godziny słonecznej). Dla porównania, zgodnie z danymi publikowanymi przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, usłonecznienie w Poznaniu w roku 2023 wyniosło ok. 1800-1900 godzin. Daje to średnią dzienną na poziomie w przybliżeniu 5 godzin. W styczniu 2024 natomiast zgodnie z danymi IMGW usłonecznienie w Poznaniu wyniosło ok 60-70 godzin. Daje to średnią miesięczną w przybliżeniu 2 godziny/dzień. Sugeruje to, że tydzień, podczas którego przeprowadzono pomiary był stosunkowo ubogi w liczbę godzin słonecznych. Z tego też powodu, można założyć, że faktyczna efektywność pobierania energii słonecznej będzie wyższa, z uwagi na większą liczbę godzin słonecznych.

Na podstawie pomiarów wysunąć można wniosek, że rozwiązanie takie w największym stopniu znaleźć może zastosowanie w warunkach pogodowych większego nasłonecznienia. Należy jednakże zwrócić uwagę, że faktycznie istotnym parametrem, poprawiającym efektywność rozwiązania jest nasłonecznienie oraz natężenie promieniowania. Sam wzrost temperatury, zgodnie z artykułem “Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych” autorstwa Pawła Matuszczyka, Tomasza Popławskiego oraz Janusza Flaszki, ma negatywny wpływ na sprawność paneli fotowoltaicznych. Wzrost temperatury, jednakże często idzie w parze ze wzrostem nasłonecznienia oraz natężenia promieniowania, co w efekcie zwiększa ilość energii pobieranej i przetwarzanej przy wykorzystaniu paneli.

Wspomniane wcześniej warunki odpowiadają pogodzie, która charakterystyczna jest dla czasu i miejsca, w którym odbywają się zawody European Railway Challenge w Niemczech oraz zawody Railway Challenge w Anglii. Jest to więc rozwiązanie, które najlepiej sprawdza się podczas konkursów, w których start jest głównym celem pracy zespołu PUTrain. Wyniki obrazują również, że pomimo niesprzyjających warunków instalacja jest w stanie zmagazynować taką ilość energii, która istotnie wpływa na zasięg pojazdu w warunkach konkursu. Aby w pełni jednak określić, o ile zasięg lokomotywy może zostać wydłużone, należy dokonać pomiarów w miejscu konkursowym. Zgodnie z danymi jednak średnia liczba dni deszczowych w obu tych miastach w czerwcu jest podobna i wynosi 8. Powyższe dane pochodzą z serwisu “Climate Data”.

Kolejnym istotnym czynnikiem, który zależy jest od pory roku, a także pory dnia jest kąt padania promieni słonecznych względem ogniw fotowoltaicznych. Największą produkcję energii elektrycznej w module otrzymuje się, gdy promieniowanie słoneczne pada pod kątem prostym w stosunku do modułu. Dach lokomotywy względem ziemi jest równoległy, kolejnym ważnym czynnikiem jest jego kształt - powierzchnia jest płaska. Nie jest to najbardziej optymalny kąt umiejscowienia paneli pod jakim produkowałyby najwięcej energii, czego potwierdzenie znaleźć można w artykule "Analiza poprawności montażu paneli słonecznych dla systemów IoT" autorstwa Marcina Słoty. Podczas przeprowadzonych badań autor wykazał, że najbardziej referencyjnym kątem zabudowy modułów fotowoltaicznych jest kąt zbliżony do 50-60 stopni, a najmniej korzystnym kąt 0 stopni. Autor zamodelował również wykres teoretycznej produkcji energii w zależności od miesiąca w roku. Według tej zależności panel 100W zamontowany pod kątem 0 stopni w styczniu w ciągu dnia potrafi wytworzyć około 120-160Wh dziennie, natomiast w miesiącach maj-sierpień wartość wytworzonej przez taki moduł energii powinna przekroczyć 600Wh na dzień. Osiągnięty wynik pomiarów dla dwóch paneli usytuowanych pod kątem 0 stopni w stosunku do ziemi jest gorszy w porównaniu do teoretycznego modelu Pana Marcina Słoty, niemniej fakt, że średni dzienny czas nasłonecznienia był o 25% niższy niż statystyczny można założyć, że wynik również mogłyby być korzystniejsze i średnia dzienna wartość wytworzonej energii mogłaby być porównywalna. Jeżeli zatem można przeprowadzone pomiary powiązać z teoretycznym modelem produkcji energii elektrycznej, można szacować, że w miesiącach maj-sierpień produkcja energii będzie oscylować około 600Wh na 1 moduł, czyli 1200Wh dziennie na pojazd, co pozwoli zwiększyć dostępny zasięg o około 1800 metrów, czyli około 12,5% znamionowego zasięgu pojazdu.